

УДК 53.082.79

## НЕЙТРОННАЯ ДИФРАКЦИЯ И СПЕКТРОМЕТРИЯ НА ИМПУЛЬСНОМ НЕЙТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ “РАДЭКС” ИЯИ РАН

© 2019 г. В. С. Литвин<sup>1,2,\*</sup>, А. А. Алексеев<sup>1</sup>, Д. Н. Трунов<sup>1</sup>, С. Н. Аксенов<sup>1</sup>, Е. С. Клементьев<sup>1,3</sup>, В. Н. Марин<sup>1</sup>, С. И. Поташев<sup>1</sup>, А. А. Столяров<sup>1</sup>, Ю. Б. Лебедь<sup>1</sup>, В. Л. Кузнецов<sup>1</sup>, С. П. Кузнецов<sup>2</sup>, И. В. Мешков<sup>2</sup>, Р. А. Садыков<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119333 Москва, Россия

<sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236041 Калининград, Россия

\*E-mail: vlitvin@inr.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

После доработки 30.08.2018 г.

Принята к публикации 30.08.2018 г.

Импульсный нейтронный источник “РАДЭКС” на базе линейного протонного ускорителя ИЯИ РАН имеет один вертикальный канал с пролетной базой 4 м и три горизонтальных канала с пролетными базами примерно 10, 20, 30 и 50 м. Источник характеризуется оригинальной конфигурацией: мишень и водяной замедлитель расположены перпендикулярно протонному пучку, благодаря чему спектр нейтронов обогащен эпитепловыми и каскадными нейтронами. На источнике можно проводить исследования в областях ядерной физики, физики конденсированного состояния и наноструктур. Представлены результаты, полученные на различных пролетных базах горизонтальных каналов нейтронного источника “РАДЭКС”. Проведены тестовые измерения, получены спектры прямого пучка для горизонтальных нейтронных каналов и нейтронограммы тестовых образцов. Определено разрешение для разных пролетных баз нейтронного источника. Продемонстрирована возможность проведения фазового анализа.

**Ключевые слова:** импульсный источник нейтронов, эпитепловые нейтроны, нейтронная дифракция.

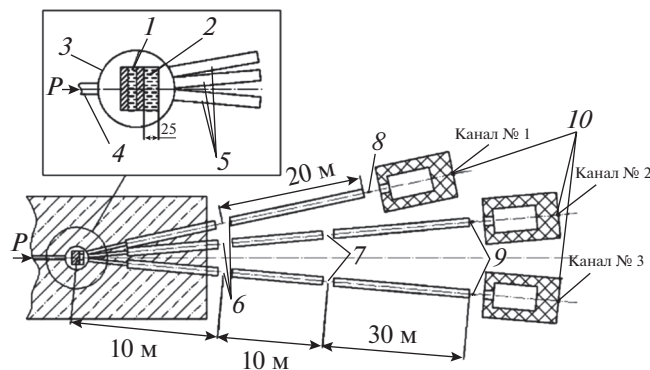
**DOI:** 10.1134/S0207352819030132

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные источники нейтронов на базе ускорителей протонов являются наиболее перспективными как в плане интенсивности, так и экологической безопасности. Кроме того, данные источники обеспечивают широкий энергетический спектр нейтронов – от энергии холодных нейтронов вплоть до энергии протонов, рождающих нейтроны. В частности, на импульсных источниках можно создавать дифрактометры и спектрометры, предназначенные для исследования неупругого рассеяния эпитепловых или надкадмиевых нейтронов (с энергией выше 0.55 эВ, т.е. с энергией, выше которой резко падает сечение поглощения в кадмии). Например, на импульсном источнике ISIS (Великобритания) имеется установка VESUVIO, предназначенная для глубоко неупругого рассеяния нейтронов – аналога комптоновского рассеяния. Этот метод позволяет получить импульсное распределение и среднюю кинетическую энергию атомов [1–3]. Для дифракции эпитепловые нейтроны представляют интерес, так как позволяют исследовать

структуру материалов, содержащих вещества, сильно поглощающие тепловые нейтроны, например Cd, Gd, Sm, Eu, Dy [4, 5]. Кроме того, эпитепловые нейтроны применяются и для анализа элементного и изотопного состава веществ. Также на таких пучках нейтронов можно проводить радиографию и томографию с использованием изотопного контраста [3]. Источники эпитепловых нейтронов сооружают также и на исследовательских реакторах, например на FRM-II (Германия) и на высокопоточном реакторе Института Лауэ–Ланжевена (ILL, Франция). Такие источники имеют графитовый замедлитель, разогреваемый гамма-квантами из активной зоны реактора до 2000–3000 К.

В состав экспериментального комплекса ИЯИ РАН входят три импульсных источника нейтронов – ИН-06 [6], “РАДЭКС” [7] и СВЗ-100 [8]. Драйвером всех источников является линейный ускоритель протонов. Нейтроны в мишенях установок образуются в результате каскадно-испарительного (spallation) процесса. Источник ИН-06 характеризуется тепловым спектром и предна-



**Рис. 1.** Схема источника “РАДЭКС” и горизонтальных нейтронных каналов: 1 – вольфрамовая мишень; 2 – водяной замедлитель; 3 – герметичная ампула мишенного узла; 4 – ионпровод; 5 – горизонтальные каналы-нейтроноводы; 6 – пролетная база 10 м; 7 – пролетная база 20 м; 8 – пролетная база 30 м; 9 – пролетная база 50 м; 10 – ловушки.

значен главным образом для исследований в области физики конденсированных сред и материаловедения, источник СВЗ-100 – резонансными спектрами и предназначен для измерения сечений поглощения, а источник “РАДЭКС” – каскадными и тепловыми с большой долей эпитепловых нейтронов. Данный источник разрабатывался для экспериментов в области радиационной и ядерной физики. Например, была проведена серия экспериментов, в которых исследовалось  $np$ -взаимодействие [9]. Однако, как будет показано далее, источник “РАДЭКС” может применяться и для исследований в области физики конденсированных сред и материаловедения. В отличие от большинства подобных источников, имеющих лепестковый замедлитель (например, источника ИН-06 [6]), замедлитель источника “РАДЭКС” расположен перпендикулярно падающему протонному пучку, непосредственно за мишенью (рис. 1). В такой конфигурации в замедлитель попадает практически половина всех нейтронов, родившихся в мишени, что обеспечивает более высокий выход нейтронов на один протон по сравнению с лепестковыми замедлителями. Однако при таком расположении замедлителя большая часть каскадных нейтронов проходит сквозь него и, не замедлившись, попадает в каналы, расположенные за замедлителем по ходу пучка. Также в каналы попадают и гамма-кванты, образующиеся в мишени при попадании в нее протонов. Однако, как показали эксперименты, их наличие не мешает проведению измерений в области тепловых и эпитепловых нейтронов (на пролетных базах 10 м и более) за счет разницы во времени пролета более 1 мс.

В настоящей работе представлены результаты, полученные на различных пролетных базах гори-

зонтальных каналов нейтронного источника “РАДЭКС”. Разрешение времяпролетного дифрактометра ( $\Delta d/d$ ) можно выразить через временную неопределенность  $\Delta t$  и неопределенности расстояния  $\Delta L$  и угла  $\Delta\theta$ :

$$\Delta d/d = [(\Delta t/t)^2 + (\Delta L/L)^2 + (\Delta\theta \operatorname{ctg}\theta)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина пролетной базы,  $t$  – время пролета и  $\theta$  – угол дифракции.

Из формулы (1) следует, что наилучшее разрешение достигается при углах рассеяния, близких к  $2\theta = 180^\circ$ . Неопределенность расстояния  $\Delta L$  зависит от размера детектора. Временная неопределенность зависит от длительности импульса протонного пучка, времени замедления нейтронов и точности время-цифрового преобразователя (ВЦП). Длительность протонных импульсов может варьироваться в пределах 1–200 мкс. Термализация нейтронов происходит в водяном замедлителе толщиной 2.5 см. Процесс термализации дополнительно увеличивает длительность импульса тепловых нейтронов. Например, в замедлителе толщиной 5 см источника ИН-06 в случае продолжительности протонного импульса 90 мкс длительность составляет 130 мкс [10]. Эффект от замедлителя источника “РАДЭКС” будет рассмотрен ниже. Более высокого разрешения можно добиться, используя короткие импульсы протонов либо прерыватель потока нейтронов, уменьшающих длительность импульса тепловых нейтронов.

Целью настоящей работы было изучение возможности использования пролетных баз нейтронного источника “РАДЭКС” на различных каналах для исследований в области физики конденсированного состояния и наноструктур. Были измерены спектры прямого пучка, получены нейтронограммы тестовых образцов – порошка карбонадо (технического алмаза) и углеродных материалов.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

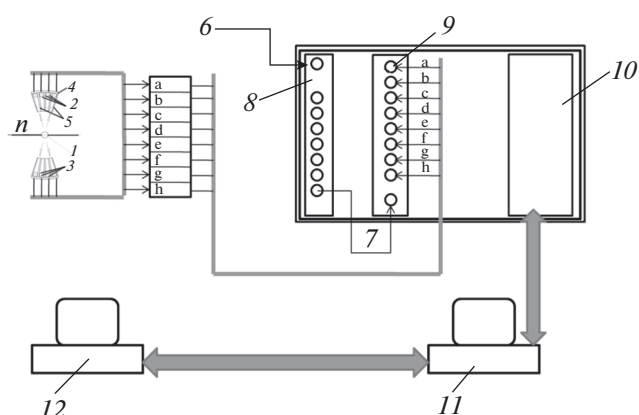
Рассматриваемый в настоящей работе нейтронный источник “РАДЭКС” (рис. 1) имеет вольфрамовую мишень с водяным охлаждением. Мишень состоит из пакета вольфрамовых пластин, расположенных с промежутками, в которых циркулирует охлаждающая вода. За мишенью по ходу протонного пучка расположен водяной замедлитель толщиной 25 мм. Ось протонного пучка проходит перпендикулярно замедлителю через его центр. От мишенного узла отходит один вертикальный канал с пролетной базой 4 м и три горизонтальных канала с несколькими пролетными базами – 10, 20, 30 и 50 м (рис. 1). Каналы расположены под углом не более  $5^\circ$  относительно направления протонного пучка.

Сам мишенный узел окружен десятиметровой защитой из стали и бетона. Начальная часть горизонтальных каналов (участок длиной 8 м) имеет диаметр 100 мм, далее диаметр каналов – 200 мм. На расстоянии 10 м от мишенного узла каналы выходят из биологической защиты и продолжают в виде вакуумированных труб диаметром 200 мм. Внутри труб помещаются коллиматоры из графита или борированного полиэтилена. Общая длина горизонтального канала (от поверхности замедлителя до окна на конце) № 1 – 30 м, а каналов № 2 и № 3 – 50 м. Эти трубы имеют промежутки на расстояниях 10 и 20 м. На концах труб установлены герметичные фланцы, которые закрываются алюминиевыми окнами. Таким образом, на каналах № 2 и № 3 могут располагаться три установки (на канале № 1 – только две).

Следует отметить, что из горизонтального канала № 1 “виден” только водный замедлитель, но не область рождения нейтронов. А из каналов № 2 и № 3 “видна” через водный замедлитель область рождения нейтронов (рис. 1). Это приводит к тому, что спектры прямых пучков этих каналов несколько различаются.

Для регистрации нейтронов были использованы пропорциональные счетчики, заполненные  $\text{BF}_3$  (на прямом пучке) и  $^3\text{He}$  (для дифракции). Дифракционные эксперименты проводили с помощью макета нейтронного дифрактометра, в состав которого входили цилиндрические газоразрядные гелиевые счетчики СНМ-17, заполненные  $^3\text{He}$ , либо линейные сцинтилляционные [11], разработанные и изготовленные в ИЯИ РАН. Схема эксперимента представлена на рис. 2. Регистрацию осуществляли детекторы, расположенные под углами  $90^\circ$ – $134^\circ$  по направлению к падающему нейтронному потоку. Детекторы 2, 3 располагались в корпусе 4 из борированного полиэтилена, обернутого листовым кадмием, с коллиматорами 5.

Применявшаяся система регистрации сигналов и накопления данных, в состав которой входили усилители-дискриминаторы, блок синхронизации, ВЦП и компьютер-контроллер в системе “КАМАК”, разработана и изготовлена в ИЯИ РАН [12]. Сигнал со счетчиков после усилителя-дискриминатора регистрируется с помощью ВЦП. Алгоритм работы этой системы следующий. Перед началом измерений с главного компьютера программируется режим работы блока синхронизации (задержка сигнала “СТАРТ”, т.е. начала измерения времени относительно синхроимпульса, и продолжительность измерения времени) и режим работы каждого блока ВЦП (записывается ширина кванта времени и режим работы – нормальный или логарифмический, который позволяет измерять время в логарифмическом, по основанию два, масштабе). Синхроимпульс ускорителя приходит



**Рис. 2.** Схема дифракционного эксперимента на источнике “РАДЭКС”: 1 – исследуемый образец; 2 – сцинтилляционные счетчики нейтронов; 3 – счетчики нейтронов, заполненные гелием-3; 4 – борполиэтиленовая защита детекторов; 5 – коллиматоры дифрактометра; 6 – синхроимпульс ускорителя; 7 – сигнал ворот от блока синхронизации; 8 – блок синхронизации; 9 – ВЦП с накоплением гистограмм; 10 – кейт-контроллер “КАМАК”; 11 – компьютер управления и сбора информации; 12 – компьютер удаленного доступа. Латинскими буквами обозначены выходы детекторов и входы ВЦП.

на блок синхронизации, который вырабатывает с заданной задержкой сигнал ворот, необходимый для разрешения работы ВЦП. Начало сигнала ворот запускает отсчет времени в ВЦП. Сигналы со счетчиков тепловых нейтронов поступают на усилители-дискриминаторы, где происходит усиление, отделение от шума, и формируются стоповые импульсные сигналы в стандарте NIM (Nuclear Instrumentation Module), которые поступают на входы ВЦП. ВЦП кодирует время между сигналами “СТАРТ” и соответствующими стоповыми сигналами и увеличивает счет импульсов в ячейке памяти ВЦП, соответствующей времени пролета. Таким образом, формируется гистограмма, соответствующая измеряемому спектру.

Блок синхронизации имеет следующие параметры.

1. Задержка сигнала ворот относительно синхроимпульса ускорителя 0–64 мс с шагом 1 мкс.
2. Формирование ширины импульса ворот, т.е. общей длительности спектра, 0–64 мс.
3. Блок содержит восемь выходов сигнала ворот, т.е. может управлять восемью блоками ВЦП.
4. Блок ВЦП имеет один общий стартовый вход и восемь стоповых входов.
5. Каждый измерительный канал насчитывает 4096 градаций времени с квантом от 0.125 до 128 мкс и задержкой начала кодирования от 0.0625 до 8 мс, программируемой через компьютер.

Для управления этой системой регистрации разработаны драйвер и программа в операционной системе LINUX [12], которые позволяют настра-

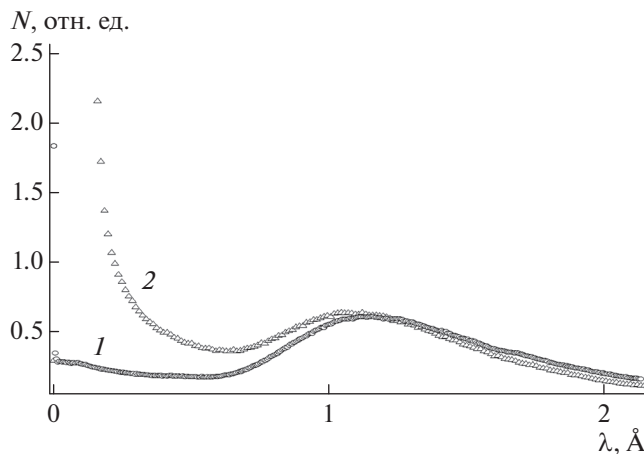


Рис. 3. Спектры нейтронов прямых пучков источника “РАДЭКС”, полученные на горизонтальном канале № 1 (1) и № 2 (2).

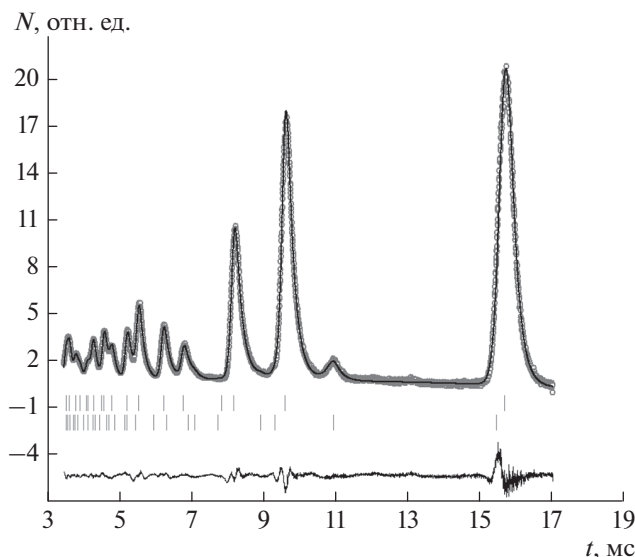


Рис. 4. Полнопрофильный анализ нейтронной дифрактограммы карбонадо, полученной на 20-метровой пролетной базе: кружки – экспериментальные данные; линия – расчетный профиль, нижняя кривая – разность между ними. Верхняя и нижняя строчки вертикальных штрихов – положения брэгговских пиков алмаза и алюминия соответственно. Дифрактограмма нормирована на спектр некогерентного рассеяния ванадия.

ивать блоки, управлять экспериментом, накапливать данные и отображать спектры в режиме реального времени. Управление компьютером-контроллером можно осуществлять дистанционно через локальную сеть либо через Интернет, избавляя персонал от необходимости заходить в экспериментальную зону с повышенным радиационным фоном.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Спектры прямого нейтронного пучка.** Время-пролетный спектр нейтронов, падающих на обра-

зец, регистрировал детектор прямого пучка на горизонтальных каналах. Для регистрации прямого пучка был использован пропорциональный счетчик цилиндрической формы, наполненный газом  $\text{BF}_3$ .

Энергия максимума спектра в канале № 1 соответствует 1.1 Å, а в канале № 2 – 1.2 Å, т.е. эти значения близки друг к другу. Существенное отличие, как видно из графика (рис. 3), проявляется в области малых длин волн. В канал № 1 попадает значительно меньшая доля быстрых и эпитепловых нейтронов, чем в канал № 2. Это объясняется тем, что из канала № 1 “виден” только замедлитель, а из каналов № 2 и № 3 “видна” еще и область рождения нейтронов, и в эти каналы попадает большее количество незамедлившихся нейтронов. Спектр канала № 3 точно такой же, как и канала № 2.

**Измерения тестовых образцов. Разрешение на различных пролетных базах нейтронного источника “РАДЭКС”.** Были проведены тестовые дифракционные измерения образцов синтетического алмаза, сплава 40ХНЮ и углеродных материалов на пролетных базах 13.72 и 46.54 м (рис. 4 и 5 соответственно).

Для определения разрешения на двух пролетных базах использовали дифрактограммы порошка синтетического алмаза (карбонадо). Этот порошок был выбран в качестве тестового образца, потому что имеет большое сечение когерентного рассеяния, не поглощает нейтроны и не рассеивает некогерентно. Из данных рентгеновской дифракции установлено, что ширина брэгговских пиков данного образца карбонадо гораздо меньше приборного уширения нейтронных дифрактометров на источнике “РАДЭКС” в их нынешнем виде. Поэтому ширину брэгговских пиков, полученных на рентгеновских дифрактометрах, можно считать связанной исключительно с образцом, и использовать для определения разрешения нейтронных дифрактометров. На рис. 5а приведены необработанные спектры, полученные на 50-метровой пролетной базе. Обработку проводили методом Ритвелда с помощью программы FullProf [13]. Поскольку интенсивность падающего пучка нейтронов зависит от длины волны, а также из-за того, что эффективность детектора зависит от длины волны регистрируемых нейтронов, во время-пролетных экспериментах необходима нормировка полученных спектров, в данном случае – дифрактограмм. При измерениях на пролетной базе 20 м (уточненная по дифракционным данным длина пролетной базы составляла 21.3 м) нормировка была проведена на спектр некогерентного рассеяния нейтронов на ванадии, который повторяет спектр падающего на образец пучка. При измерениях на пролетной базе 50 м (уточненная длина составляла 46.54 м) осуществляли нормировку на фон, полученный линейной ап-



проксимацией точек между пиками алмаза. Разрешение дифрактометра определяли по ширине брэгговских пиков алмаза.

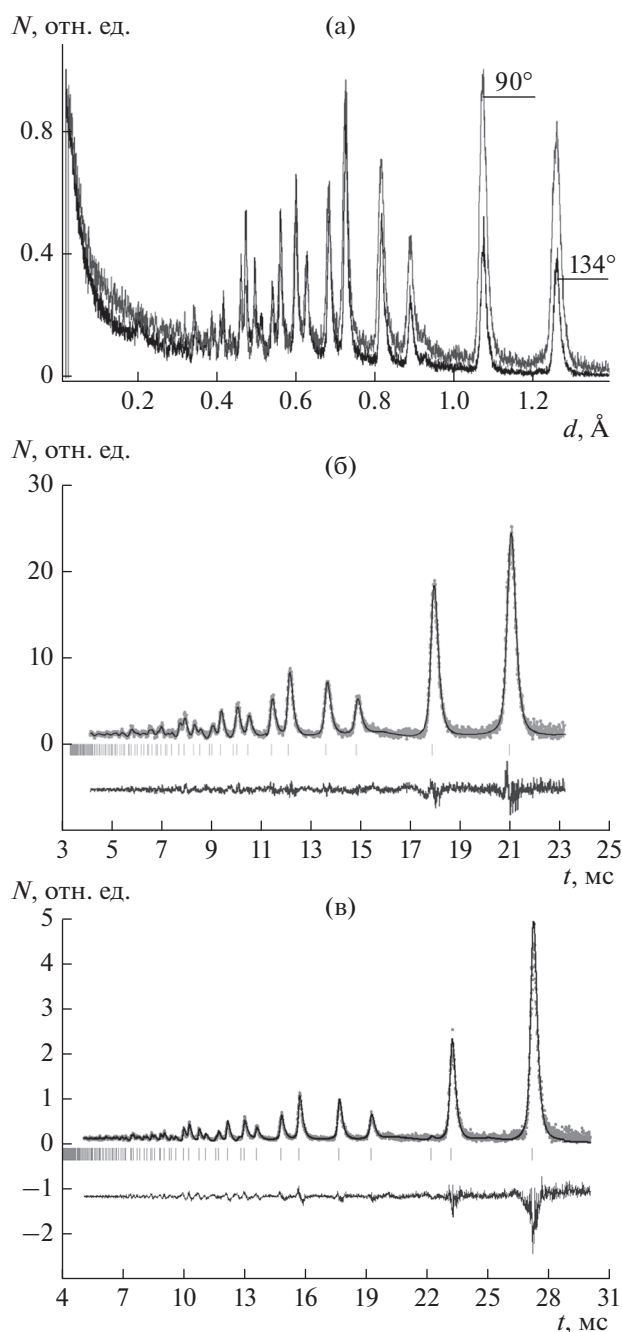
Для тестового образца карбонадо на пролетной базе 20 м и для детектора, расположенного под углом 90°, были уточнены параметры методом Ритвельда с помощью программы FullProf (рис. 4):  $R_p = 4.40\%$ ,  $R_{wp} = 6.36\%$ . Параметр решетки алмаза был зафиксирован ( $a = 3.567 \text{ \AA}$ ), и проводилось уточнение длины пролетной базы (21.3 м) и формы пиков. Кроме пиков образца карбонадо на дифрактограмме (рис. 4) присутствуют небольшие пики фазы алюминия, так как образец находился в алюминиевом контейнере. Положения брэгговских пиков алмаза показаны в верхней строчке пикетировки под экспериментальными данными, а пиков алюминия – в нижней строчке. Под двумя строчками пикетировки приведена кривая разности между экспериментальным и расчетным профилями. Разрешение дифрактометра определяли по ширине брэгговских пиков алмаза.

На пролетной базе 50 м (46.54 м) и тестовом образце синтетического алмаза были получены результаты уточнения (рис. 5а, 5б) для детекторов, расположенных под углами 90° и 134° к падающему пучку нейтронов. Факторы расходимости:  $R_p = 9.94\%$ ,  $R_{wp} = 14.7\%$ .

Сопоставление нейтронограмм, полученных с помощью детекторов, расположенных под различными углами к направлению пучка падающих нейтронов, позволяет найти длительность тепловой части нейтронного импульса из полученных значений разрешения дифрактометра согласно (1). Для длины волны 1 Å получена оценка 90 мкс при длительности протонного импульса 50 мкс.

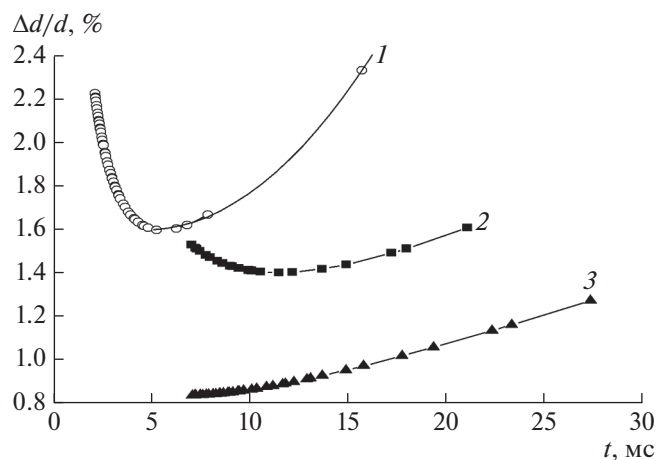
Разрешение по  $d$ , достигнутое на пролетной базе 20 м, 1.6–2.3%, а на 50 м – 1.4–1.6% при угле рассеяния  $2\theta = 90^\circ$ . Зависимости разрешения на этих базах от времени пролета при углах рассеяния 90° и 134° приведены на рис. 6.

**Исследование структуры сплава 40ХНЮ.** На пролетной базе 50 м была исследована структура сплава 40ХНЮ (Ni – основной, Cr – 39–41 мас. %, Al – 3.3–3.8 мас. %) на образцах различной твердости. Этот сплав немагнитный и обладает твердостью до 60 ед. по Роквеллу. С помощью электронной микродифракции и микроскопии [13–18] и ранее с помощью времяпролетной дифракции [19] было установлено, что сплав состоит из трех фаз: твердого раствора на основе  $\gamma$ -фазы никеля ( $\gamma$ -фаза), твердого раствора на основе  $\alpha$ -фазы хрома ( $\alpha$ -фаза) и  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ -фаза).  $\gamma$ -Фаза представляет собой твердый раствор хрома в  $\gamma$ -никеле с кубической ГЦК-решеткой, имеющей пространственную группу симметрии  $Fm\bar{3}m$ ,  $\gamma'$ -фаза – это фаза  $Ni_3Al$  с симметрией  $Pm\bar{3}m$ .

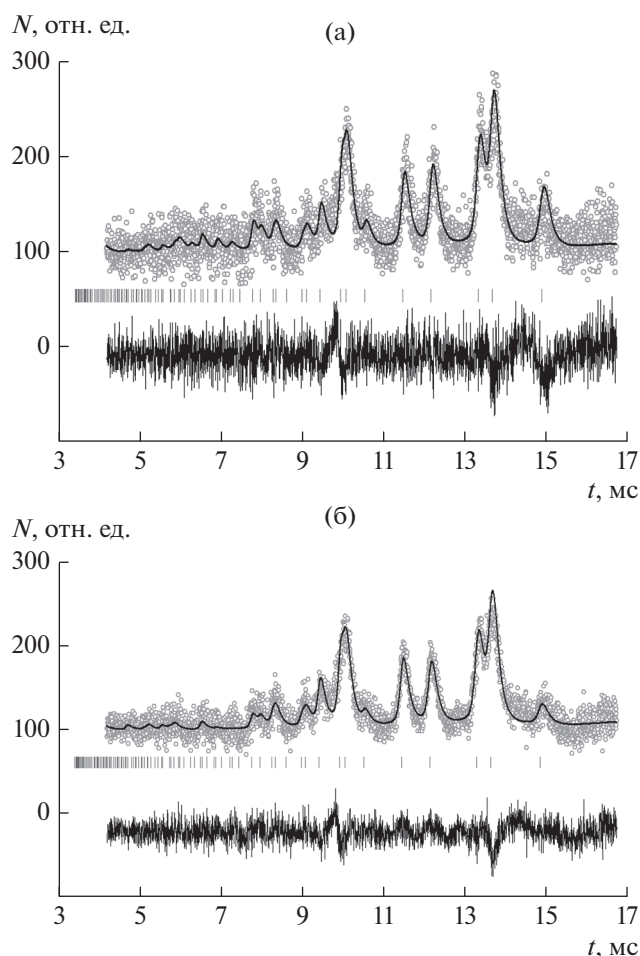


**Рис. 5.** Времяпролетный спектр карбонадо, полученный на установке “РАДЭКС”, пролетная база 46.6 м: а – необработанные спектры, углы рассеяния  $2\theta = 90^\circ$  и  $134^\circ$ ; б, в – после обработки методом Ритвельда,  $2\theta = 90^\circ$  (б) и  $134^\circ$  (в). Кружки – экспериментальные данные, линия – теоретическая дифрактограмма, нижняя кривая – их разность. Штрихами отмечены положения брэгговских пиков алмаза. Дифрактограммы нормированы на кривую, полученную линейной интерполяцией фона между пиками алмаза.

Измерения проводили на макете дифрактометра при угле рассеяния  $2\theta = 90^\circ$ , пролетная база 46.6 м. Полученные времяпролетные спектры нормировали на фон (кривую, полученную путем



**Рис. 6.** Зависимость разрешения дифрактометра на 20-метровой пролетной базе под углом  $90^\circ$  (1) и на 50-метровой пролетной базе под углами  $90^\circ$  (2) и  $134^\circ$  (3) от времени пролета.



**Рис. 7.** Полнопрофильный анализ времяпролетного спектра сплава 40ХНЮ после закалки при  $1200^\circ\text{C}$  (а) и после упрочняющего отжига (б). Проведена нормировка на фон. Пролетная база 46.6 м, угол рассеяния  $2\theta = 90^\circ$ . Штрихи отмечают положения брэгговских пиков  $\gamma$ -фазы сплава.

линейной интерполяции точек, лежащих между пиками). Обработку проводили методом Ритвельда с помощью программы FullProf. Полученные дифрактограммы приведены на рис. 7.

На дифрактограмме удалось идентифицировать только пики  $\gamma$ -фазы — твердого раствора на основе никеля. Для образца сплава после закалки параметр решетки  $\gamma$ -фазы  $a = 3.5719(6) \text{ \AA}$  (рис. 7а). Факторы расходимости:  $R_p = 10.5\%$ ,  $R_{wp} = 13.4\%$ . После упрочняющего отжига параметр решетки образца сплава  $a = 3.5603(4) \text{ \AA}$ ,  $R_p = 7.72\%$ ,  $R_{wp} = 9.77\%$  (рис. 7б).

Сравнивая полученные дифрактограммы, можно сделать вывод о том, что образцы сплава с большой твердостью (после упрочняющего отжига) имеют меньший параметр решетки  $\gamma$ -фазы по сравнению с мягкими образцами сплава (после закалки). Это уплотнение, вероятно, связано с изменением содержания хрома в данной фазе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены тестовые эксперименты на импульсном источнике нейтронов “РАДЭКС”. Установлено, что спектры источника обогащены эпитепловыми нейтронами. На источнике можно проводить исследования методами нейтронной дифракции и спектроскопии, используя тепловые и особенно эпитепловые нейтроны, что может быть полезно для исследований структуры и динамических свойств веществ, содержащих редкоземельные элементы. Максимум спектра горизонтальных каналов № 1 и 2 (с максимальными пролетными базами 50 м) приходится на  $1.1 \text{ \AA}$ , спектры этих каналов также обогащены эпитепловыми нейтронами. Максимум спектра горизонтального канала № 3 приходится на  $1.2 \text{ \AA}$ .

Проведены тестовые дифракционные эксперименты. Разрешение, достигнутое на пролетной базе 20 м, —  $1.6\text{--}2.3\%$ , на пролетной базе 50 м —  $1.4\text{--}1.6\%$ . Для длины волны  $1 \text{ \AA}$  оценена длительность нейтронного импульса — 90 мкс при длительности протонного импульса 50 мкс.

С помощью метода нейтронной дифракции исследована структура сплава 40ХНЮ. Обнаружено уменьшение параметра решетки  $\gamma$ -фазы (твердого раствора на основе никеля) от  $3.5719(6)$  до  $3.5603(4) \text{ \AA}$  в результате упрочняющего отжига.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН” (уникальный идентификатор работ RFMEFI62117X0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sosnick T.R., Snow W.M., Sokol P.E.* // Phys. Rev. B. 1990. V. 41. P. 11185. doi 10.1103/PhysRevB.41.11185
2. *Anthony P.L., Arnold R.G., Band H.R. et al.* // Phys. Rev. D. 1996. V. 54. P. 6620. doi 10.1103/Phys.RevD.54.6620
3. *Gorini G., Festa G., Andreani C.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 571. P. 012005. doi 10.1088/1742-6596/571/1/012005
4. *Kuwahara K., Sugiyama S., Iwasa K. et al.* // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. S. 1. P. s302. doi 10.1007/s003390201399
5. *Ishikawa Y., Watanabe N., Tajima K., Sekine H.* // Phys. Lett. A. 1974. V. 48. P. 159. doi 10.1016/0375-9601(74)90522-2
6. *Алексеев А.А., Садыков Р.А., Литвин В.С. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 12. С. 1. doi 10.7868/S0207352814120026
7. *Рябов Ю.В., Грачев М.И., Каманин Д.В. и др.* // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 5. С. 957.
8. *Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И. и др.* Нейтронный комплекс ИЯИ РАН. Спектрометр нейтронов по времени замедления в свинце (СВЗ-100). Оценка характеристик измерительных каналов. ПРЕПРИНТ № 1325/2012. М.: ИЯИ РАН, 2012. 36 с.
9. *Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Мордовской М.В. и др.* // Ядерная физика. 2013. Т. 76. С. 1479. doi 10.7868/S0044002713110111
10. *Кузнецов С.П., Мешков И.В., Садыков Р.А. и др.* // Краткие сообщения по физике. 2013. № 9. С. 3.
11. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 1. doi 10.7868/S003281621801007X
12. *Марин В.Н., Поташев С.И., Трунов Д.Н. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 6. С. 1.
13. *Rodríguez-Carvajal J.* // Commission on Powder Diffraction (IUCr). Newsletter. 2001. V. 26. P. 12. doi 10.7868/S0032816214050206
14. *Петров В.А., Суховаров В.Ф., Стократов Р.Д.* // Изв. вузов. Физика. 1983. № 8. С. 110.
15. *Петров В.А., Суховаров В.Ф., Стократов Р.Д.* // Изв. вузов. Физика. 1984. № 6. С. 24.
16. *Петров В.А., Суховаров В.Ф., Стократов Р.Д.* // Изв. вузов. Физика. 1984. № 9. С. 104.
17. *Петров В.А., Вершинина Л.И., Суховаров В.Ф., Стократов Р.Д.* // Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 57. № 1. С. 127.
18. *Петров В.А., Суховаров В.Ф., Стократов Р.Д.* // Физика металлов и металловедение. 1983. Т. 56. № 1. С. 72.
19. *Кузнецов С.П., Литвин В.С., Марин В.Н. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 5. С. 29. doi 10.7868/S0207352818050037

**Neutron Diffraction and Spectrometry at a Pulsed Neutron Source RADEX at INR RAS**

**V. S. Litvin, A. A. Alekseev, D. N. Trunov, S. N. Aksenov, E. S. Clementyev, V. N. Marin, S. I. Potashev, A. A. Stolyarov, Yu. B. Lebed, V. L. Kuznetsov, S. P. Kuznetsov, I. V. Meshkov, R. A. Sadykov**

The pulsed neutron source RADEX based on the linear proton accelerator at the INR RAS has one vertical channel with a span of 4 m and three horizontal channels with flying bases of approximately 10, 20, 30, and 50 m. The source has an original configuration: the target and the water moderator are located perpendicular to the proton beam; thus, the neutron spectrum is enriched with epithermal and cascade neutrons. At the source, it is possible to perform research in the fields of nuclear physics, condensed matter physics, and nanostructures. The results obtained with use of various flying bases of the horizontal channels of the neutron source RADEX are presented. Test measurements are performed; direct beam spectra for horizontal neutron channels and neutron patterns of test samples are obtained. The resolution for different flying bases of the neutron source is determined. The possibility of performing phase analysis is demonstrated.

**Keywords:** pulsed neutron source, epithermal neutrons, neutron diffraction.