

УДК 543.444

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

© 2025 г. Е. О. Серов^а, П. С. Савченков^{а, б, *}, А. В. Рогачев^а, А. И. Калюканов^а,
В. И. Боднарчук^{а, с, d}, А. В. Белушкин^{а, с, e}

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^сОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

^dГосударственный университет “Дубна”, Дубна, 141980 Россия

^eКазанский федеральный университет, Казань, 420008 Россия

*e-mail: savch92@gmail.com

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 17.11.2024 г.

Принята к публикации 17.11.2024 г.

Приведены результаты работы по созданию экспериментального стенда для отладки методов работы с поляризованными нейтронами на реакторе ИР-8. Была разработана схема поляризации монохроматического пучка нейтронов и ее анализа с использованием спин-флиппера Мезея. На пучке поляризованных нейтронов реализована рефлектометрическая схема измерений тонкопленочных образцов и экспериментально измерены коэффициенты отражения от немагнитных слоев. Полученные на стенде результаты подтверждают возможность реализации в дальнейшем нескольких методик исследования конденсированных сред: методов рефлектометрии с поляризованными нейтронами, деполяризации и радиографии с поляризованными нейтронами. Эти методы исследований реализованы на реакторе ИР-8 впервые.

Ключевые слова: поляризованная нейтронная рефлектометрия, тонкая пленка, поляризованная нейтронная радиография.

DOI: 10.31857/S1028096025010063, EDN: ABECWB

ВВЕДЕНИЕ

На реакторе ИР-8 в НИЦ “Курчатовский институт” расположено несколько нейтронографических экспериментальных станций [1], которые включают в себя дифрактометры [2–4], установку по нейтронной радиографии и томографии [5, 6] и установку по ультрамалоугловому рассеянию [7]. Однако ни на одной установке не используют поляризованные пучки нейтронов, что серьезно ограничивает круг решаемых научных задач. Внедрение техник использования поляризованных нейтронов в методах исследования материалов на источниках нейтронного излучения видится особенно важным в связи с растущей доступностью для пользователей источников синхротронного излучения (СИ) и расположенных на них экспериментальных станций для исследо-

ваний конденсированных сред методами рассеяния. Существенное преимущество исследований на источнике СИ заключается в кратно большем потоке на исследуемом образце по сравнению с установками нейтронного рассеяния, а использование поляризованных нейтронов сохраняет конкурентное преимущество нейтронных методов исследования магнитных материалов [8, 9].

Для устранения существующего методического пробела при использовании парка инструментов реактора ИР-8 было принято решение о развитии методов исследований с помощью поляризованных нейтронов. С этой целью на пятом горизонтальном экспериментальном канале (ГЭК-5) был создан стенд, на котором получен пучок поляризованных нейтронов. Основная задача при создании стенда состояла прежде всего

в отработке новых методов исследований, основанных на использовании поляризованных нейтронов, и в обучении кадров для работы на них.

Было решено начать развивать новые методы на пучках поляризованных нейтронов с метода нейтронной рефлектометрии [10, 11], поскольку он относительно несложен и методически подобен методу получения поляризованных пучков путем отражения от намагниченных зеркал.

Реализация на базе реактора ИР-8 методики рефлектометрии поляризованных нейтронов в совокупности с имеющимся парком установок Курчатовского специализированного источника СИ “КИСИ-Курчатов” [12–14] позволит сосредоточить на одной площадке Курчатовского института все базовые комплементарные методы исследования поверхностей и межслоевых границ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Конструкция стенда

Общая схема стенда приведена на рис. 1. Стенд работает при фиксированной длине волны $\lambda = 1.524 \text{ \AA}$, получаемой в результате отражения от рабочей плоскости (111) монокристалла меди (I) с мозаичностью $23'$. Подобный монохроматор обеспечивает разрешение по длине волны $\frac{d\lambda}{\lambda} = 1\%$. Коллимацию в схеме обеспечивает использование вставки 4 в коллиматор 3, которая имеет щель размером $1 \times 40 \text{ мм}$ длиной 450 мм, и регулируемой щели 6 после узла поляризатора. Щель имеет электроприводы, которые дают возможность регулировать ее вертикальные

и горизонтальные размеры в диапазоне от нуля до 60 мм и от нуля до 40 мм соответственно. Узлы поляризатора 5 и анализатора 9 состоят из постоянных магнитов, внутри которых на платформах линейного перемещения и вращения фирмы Standa устанавливают суперзеркала Fe/Si с отражательной способностью $m = 3.6$. Перемещение суперзеркал поперек пучка нейтронов реализуется с помощью линейных приводов Standa 8MT167-100 (диапазон перемещения 100 мм, расстояние за 1 шаг — 1 мкм). Вращение суперзеркал обеспечивается осью вращения Standa 8MR190-2-28 (угол поворота 360° , угол поворота за 1 шаг — 0.005°). Управление двигателями осуществляют с помощью контроллеров ONITEX OSM-42ra, подключенных к компьютеру через интерфейс RS485.

Для переворота вектора поляризации относительно ведущего магнитного поля был изготовлен спин-флиппер 7 конструкции Мезея [15]. Детектирование нейтронов осуществляют с помощью одномерного ^3He позиционно-чувствительного детектора 10, изготовленного в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ [16], который был установлен на расстоянии 1750 мм от образца. Чувствительное окно детектора $200 \times 90 \text{ мм}$, координатное разрешение 1 мм, эффективность детектора $\sim 65\%$ при длине волны $\lambda = 2 \text{ \AA}$.

Из-за особенностей расположения установки в зале реактора существуют ограничения на ее полную длину, что в свою очередь влияет на угловое разрешение. В таких условиях можно достичь углового разрешения на уровне примерно 5–10%. Учитывая разрешение по длине волны, можно утверждать, что угловое разрешение будет определять общее

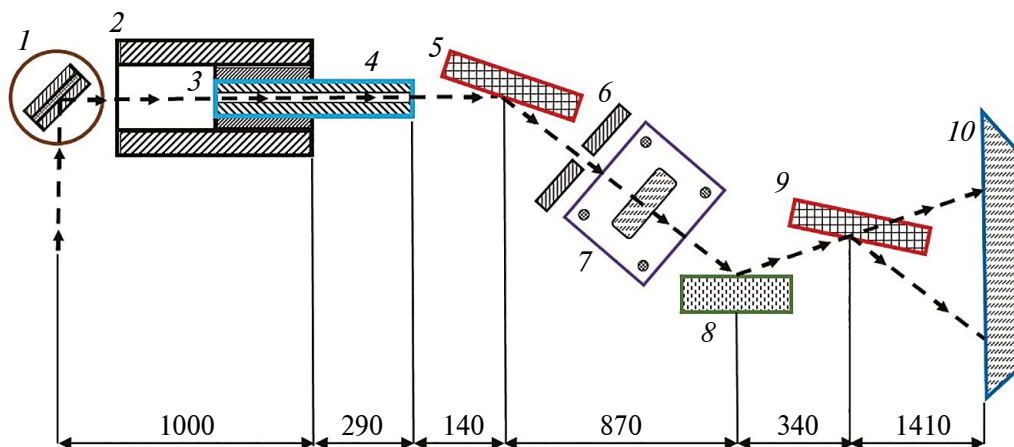


Рис. 1. Схема стенда нейтронной рефлектометрии: 1 — монохроматор Cu(111); 2 — ГЭК-5; 3 — коллиматор ГЭК-5; 4 — вставка в коллиматор; 5 — суперзеркало-поляризатор; 6 — регулируемая щель; 7 — спин-флиппер; 8 — узел образца; 9 — суперзеркало-анализатор; 10 — одномерный позиционно-чувствительный детектор.

разрешение установки по переданному импульсу. Эта особенность относит установку к классу рефлектометров с умеренным разрешением.

Тестовые измерения

Тестовые эксперименты были нацелены на определение параметров поляризованного пучка и проверку работоспособности реализованного метода нейтронной рефлектометрии. В первом эксперименте была измерена степень поляризации пучка нейтронов. Ее определяли без учета эффективности поляризатора, анализатора и спин-флиппера. Точное определение степени поляризации требует довольно серьезных измерений с привлечением эталонных магнитных зеркал и будет выполнено позже, после завершения всех работ по созданию стенда. На данном этапе простая экспериментальная оценка параметров достаточна для понимания правильности выбранной схемы установки. Степень поляризации пучка оценивали путем последовательной регистрации интенсивности пучка нейтронов после последовательного отражения от двух магнитных суперзеркал 5 и 9 (рис. 1) для двух состояний спин-флиппера, установленного между магнитными зеркалами: выключенном (рис. 2б, пик 1) и включенном (рис. 2а, пик 1). В качестве реперного

пика на детекторе одновременно регистрировали пучок, проходящий рядом с зеркалом-анализатором, не затрагивая его (рис. 2, пик 2). Реперный пучок — это часть интенсивности, отраженной от зеркала-поляризатора, но не полностью перекрываемой им вследствие расходимости. Поскольку реперный пучок попадает на детектор, не касаясь зеркала-анализатора, его интенсивность не зависит от состояния спин-флиппера.

Необходимо отметить, что на ГЭК-5 присутствует заметный фон тепловых нейтронов, который также значительно влияет на степень поляризации пучка. Для корректной оценки значения P необходимо было учесть фоновую составляющую. Измерения, выполненные для оценки степени поляризации пучка, представляют собой распределения интенсивностей отраженного, прямого пучка нейтронов (рис. 2). Для описания наблюдаемого распределения интенсивностей потребовалось ввести три гауссовых распределения, два из которых относятся к прямому и отраженному пучкам, а третье представляет собой широкий пик, лежащий в основании двух предыдущих (ограничен пунктирной линией на рис. 2). Этот третий пик и есть фоновая составляющая, присутствующая во всех измерениях. Подавление

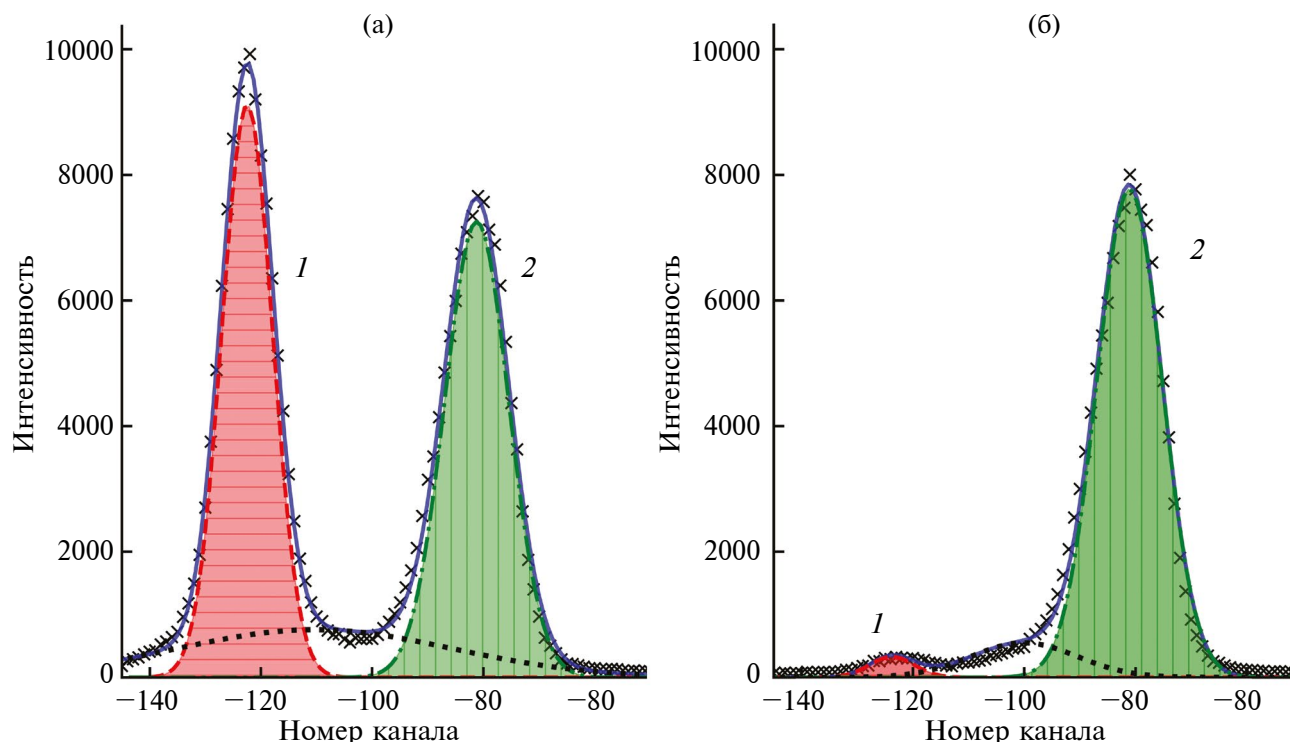


Рис. 2. Данные эксперимента по определению степени поляризации пучка нейтронов: а — спин-флиппер выключен; б — спин-флиппер включен. Символы — экспериментальные данные, сплошная линия — подгонка модели. Штриховая (1) и штрихпунктирная (2) линии отвечают вкладам поляризованных нейтронов и прямого пучка нейтронов соответственно. Пунктирная линия обозначает фон.

ние фоновой подложки — наиважнейшая задача при дальнейшем развитии стенда.

Степень поляризации пучка определяли из стандартного соотношения:

$$P = \frac{I^+ - I^-}{I^+ + I^-},$$

где I^+ и I^- — интегральные интенсивности пиков, соответствующих отраженному от зеркала-анализатора пучку нейтронов с выключенным и включенным спин-флиппером соответственно. В расчете учитывали именно гауссианы, описывающие экспериментальные распределения интенсивности по пространственной координате.

В результате была получена степень поляризации $P = 0.94$. Дальнейшее развитие стенда позволит улучшить это значение за счет увеличения точности юстировки суперзеркал в пучке, более точной подборки силы тока на катушках спин-флиппера и учета эффективности магнитных суперзеркал и спин-флиппера.

Во втором эксперименте был измерен коэффициент отражения нейтронов от тонкой пленки никеля на кремниевой подложке. Ожидаемая на основе параметров роста толщина слоя никеля составляла 40 нм. Для разных углов падения излучения на образец фиксировали интегральную интенсивность пика отражения. Угол поворота образца дополнительно верифицировали путем пересчета позиции пика на детекторе и расстояния образец–детектор. В рамках эксперимента было проведено 70 измерений с экспозицией 120 с. Изменение угла падения нейтронов на образец

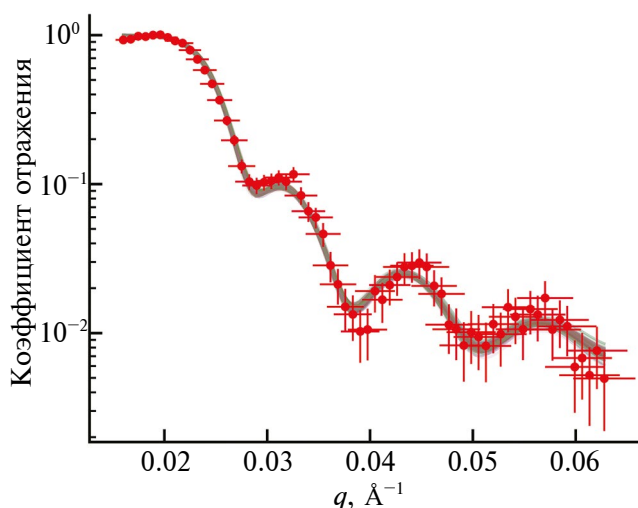


Рис. 3. Коэффициент отражения нейтронов от пленки Ni/SiO₂: точки — экспериментальные значения коэффициента отражения; линии — результат подгонки с использованием байесовского подхода и моделирования методом Монте-Карло [11], приведены 100 экземпляров из апостериорного распределения.

составляло 0.005° на каждое измерение. Полученная экспериментально зависимость коэффициента отражения нейтронов от переданного импульса представлена на рис. 3. Отчетливо наблюдаются три осцилляции, период которых прямо связан с толщиной пленки.

Расчетные значения коэффициента отражения нейтронов были получены матричным методом [18] и обработаны с использованием байесовского подхода и моделирования методом Монте-Карло [17, 19, 20]. На рис. 4 показано апостериорное

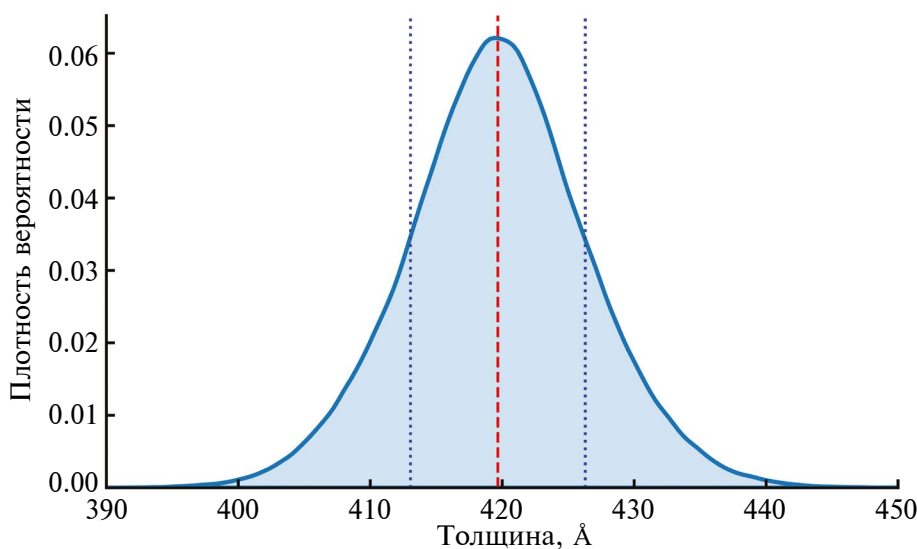


Рис. 4. Апостериорное распределение толщины слоя Ni в пленке Ni/SiO₂ по результатам обработки данных нейтронной рефлектометрии.

распределение толщины слоя Ni. Штриховая линия обозначает среднюю толщину слоя, а пунктирные линии указывают на 16-й и 84-й перцентили, которые соответствуют диапазону, охватывающему примерно 68% данных вокруг среднего значения (1σ-отклонение от среднего значения). Полученные толщина слоя Ni $d_{\text{Ni}} = 420 \pm 7$ Å и границы переходных слоев воздух–никель $d_{\text{Air-Ni}} = 8$ Å и никель–кремний $d_{\text{Ni-Si}} = 11$ Å находятся в хорошем согласии с ожидаемыми на основе параметров роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальный стенд для методических исследований с поляризованными нейтронами создан в нейтронном исследовательском комплексе на базе реактора ИР-8. В ходе тестовых экспериментов была установлена степень поляризации нейтронного пучка, составляющая 94%. На стенде реализована и апробирована на тестовом образце Ni/Si методика нейтронной рефлектометрии. Таким образом, стенд готов к проведению физических измерений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г., внутренний номер 15.СИН.21.0021, а также соглашение № 075-15-2021-1352).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят П.П. Паршина, К.В. Николаева и В.А. Матвеева за полезное обсуждение, С.С. Агафонова и Е.В. Яковенко за помощь в проведении экспериментов, И.В. Куликова и И.А. Черных за предоставление образцов для проведения тестовых экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазков В.П., Соменков В.А., Эм В.Т. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. № 3. С. 33.
2. Эм В.Т., Карпов И.Д., Сумин В.В. // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21. № 1. С. 20.
3. Рубцов А.Б., Мирон Н.Ф., Соменков В.А., Боднарчук В.И., Ярадайкин С.П. // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 2. С. 5.
4. Glazkov V.P., Naumov I.V., Shilshstein Sh.S. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1988. V. 264. P. 369. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90925-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90925-4)
5. Глазков В.П., Калоян А.А., Коваленко Е.С., Подурец К.М., Соменков В.А., Яковенко Е.В. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 18.
6. Соменков В.А., Глазков В.П., Эм В.Т., Гуреев А.И., Мурашев М.М., Садыков Р.А., Аксенов С.Н., Трунов Д.Н., Столяров А.А., Алексеев А.А., Кравчук Л.В. // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 9. С. 93. <https://doi.org/10.1134/S0207352819090142>
7. Наумов И.В., Петушков С.А., Подурец К.М. Трехосный нейтронный спектрометр на идеальных кристаллах СТОИК. Препринт ИАЭ-4368/4. М.: ИАЭ, 1986. 25 с.
8. Toperverg B.P. // Phys. Metals Metallogr. 2015. V. 116. № 13. P. 1337. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15130025>
9. Causer G.L., Guasco L., Paull O., Cortie D. // Phys. Stat. Sol. RRL. 2023. V. 17. № 6. P. 2200421. <https://doi.org/10.1002/pssr.202200421>
10. Боднарчук В.И., Булкин А.П., Кравцов Е.А., Плешанов Н.К., Сыромятников В.Г., Ульянов В.А. // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 1. С. 57. <https://doi.org/10.31857/S0023476122010040>
11. Никитенко Ю.В., Сыромятников В.Г. Рефлектометрия поляризованных нейтронов. М.: Физматлит, 2013. 218 с.
12. Зубавичус Я.В., Мухамеджанов Э.Х., Сенин Р.А. // Природа. 2013. № 12. С. 37.
13. Лебедев А.М., Меньшиков К.А., Назин В.Г., Станкевич В.Г., Цетлин М.Б., Чумаков Р.Г. // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 10. С. 44. <https://doi.org/10.31857/S1028096021100125>
14. Подурец К.М., Погорелый Д.К., Калоян А.А., Коваленко Е.С., Кон В.Г. // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 10. С. 66.
15. Mezei F. // Z. Physik. 1972. V. 255. P. 146. <https://doi.org/10.1007/BF01394523>
16. Belushkin A., Bogdze A.I., Zhuravlev V. 1D Position-Sensitive Detector for Thermal Neutrons, Tech. Rep., Frank Laboratory of Neutron Physics, 2006.
17. Savchenkov P.S., Nikolaev K.V., Bodnarchuk V.I., Pirogov A.N., Belushkin A.V., Yakunin S.N. // J. Appl. Crystallogr. 2024. V. 57. P. 1940. <https://doi.org/10.1107/S1600576724010367>
18. Foreman-Mackey D., Hogg D.W., Lang D., Goodman J. // Publ. Astronom. Soc. Pacific. 2013. V. 125. № 925. P. 306. <https://doi.org/10.1086/670067>
19. Karamanis M., Beutler F., Peacock J.A. // Monthly Notices Royal Astronom. Soc. 2021. V. 508. № 3. P. 3589. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2867>
20. Blundell S., Bland J. // Phy. Rev. B. 1992. V. 46. № 6. P. 3391. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.3391>

Experimental Setup for Methodological Research with Polarized Neutrons at the IR-8 Reactor

E. O. Serov¹, P. S. Savchenkov^{1,2,*}, A. V. Rogachev¹, A. I. Kalyukanov¹,
V. I. Bodnarchuk^{1,3,4}, A. V. Belushkin^{1,3,5}

¹*National Research Centre “Kurchatov Institute” Moscow, 123182 Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia*

³*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia*

⁴*Dubna State University, Dubna, 141980 Russia*

⁵*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

**e-mail: savch92@gmail.com*

The results of the work on the development of an experimental setup for investigating polarized neutron methods at the IR-8 reactor are presented. A scheme for polarizing a monochromatic neutron beam and analyzing it using the Mezei spin flipper has been developed. A reflectometric scheme for measuring thin-film samples has been implemented using a beam of polarized neutrons, and the reflection coefficients of non-magnetic layers have been measured experimentally. The results obtained on the setup confirm the possibility of further implementation of several methods for studying condensed matter, including polarized neutron reflectometry, depolarization, and polarized neutron radiography. These research methods were implemented at the IR-8 reactor for the first time.

Keywords: polarized neutron reflectometry, thin film, polarized neutron radiography.