

УДК 53.08

**В. В. Садилов, В. И. Боднарчук, М. В. Авдеев****Создание прототипа спектрометра спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими магнитными полями на реакторе ИБР-2**

*Рассматриваются результаты экспериментальной проверки элементов спин-эхо установки, основанной на линейно-растущих во времени магнитных полях. В работе подтверждена работоспособность методики и выявлены основные проблемы, требующие особого подхода для дальнейшего развития и реализации в качестве экспериментальной установки.*

*Ключевые слова:* спин-эхо, малоугловое рассеяние нейтронов, поляризованные нейтроны

**Об авторах**

**Садилов Валентин Викторович** – аспирант 3-го года обучения кафедры фундаментальных проблем физики микромира государственного университета «Дубна». *E-mail:* sadilov.valentin@mail.ru. 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19.

**Боднарчук Виктор Иванович** – кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела НЭОКС ЛНФ ОИЯИ.

**Авдеев Михаил Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры фундаментальных проблем физики микромира государственного университета «Дубна», начальник сектора нейтронной оптики НЭОНИКС ЛНФ ОИЯИ.

Метод нейтронного спинового эха (НСЭ) известен с 1972 г. после публикации Ф. Мезеи [1]. В основе данного метода лежит явление ларморовской прецессии магнитных моментов нейтронов в магнитном поле. Принципиальная схема спин-эхо установки подразумевает использование двух областей магнитного поля – плеч (рис. 1). Устройство, создающее область магнитного поля, в которой будет происходить вращение магнитных моментов, называется спиновым ротатором. В первом плече установки происходит вращение спинов нейтронов с частотой ларморовской прецессии. Для монохроматического

пучка фазы прецессии для разных скоростей будут разные. Поэтому на выходе из первого плеча поляризация пучка станет нулевой. Во втором плече аналогичной конфигурации магнитного поля происходит набор фазы прецессии с противоположенным знаком. Разность между фазами первого и второго плеч отражается на значении вектора поляризации и содержит в себе данные о рассеянии. На данный момент существует два варианта применения явления нейтронного спинового эха для исследований материалов.

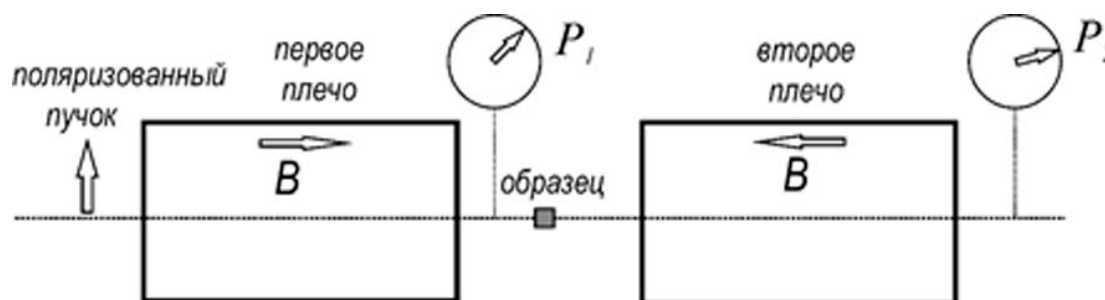


Рис. 1. Принципиальная схема спин-эхо установки

Первый – изучение динамики структуры, когда регистрируются малые изменения энергии нейтронов в результате неупругого рассеяния. Применение спин-эхо методики позволяет с разрешением, недоступным другим методам исследований, регистрировать изменение энергии нейтрона в результате взаимодействия с возбуждениями среды (до 10–7 эВ). Данный метод применяется для исследования явлений релаксации в магнитных системах, возбуждений в жидком гелии, диффузии и многих других.

Второй – исследование крупномасштабных неоднородностей в жидкостях и твердых телах, размерами порядка нескольких десятков нанометров. В 1996 г. Т. Реквельд [2] предложил применять методику НСЭ к упругому малоугловому рассеянию нейтронов (МУРН). В таком случае методика спин-эхо направлена на точное определение угла рассеяния нейтронов. Данная методика получила название *спин-эхо малоугловое рассеяние нейтронов* (СЭМУРН). К достоинствам такого метода можно отнести отсутствие необходимости в применении сильной коллимации

пучка нейтронов в отличие от традиционного малоуглового рассеяния нейтронов.

Оба метода широко используются на постоянных источниках нейтронов, но с применением на импульсных источниках возникают трудности. Однако есть методические решения применения второго метода на импульсных источниках с применением метода времени пролета. Предложенный в работе [3] метод спин-эхо основан на использовании линейно растущих во времени магнитных полей (рис. 2), подходит для использования на импульсных источниках нейтронов по методу времени пролета, позволяя измерять кривую рассеяния в широком диапазоне корреляционных длин  $Z$ .

Для увеличения чувствительности к углу рассеяния спиновые ротаторы должны быть повернуты относительно оси спектрометра и составлять с ней острый угол (рис. 3). В таком случае разность пролетных расстояний внутри плеч спин-эхо установки будет максимальной, что в результате приведет к максимальному значению разности фаз прецессии.

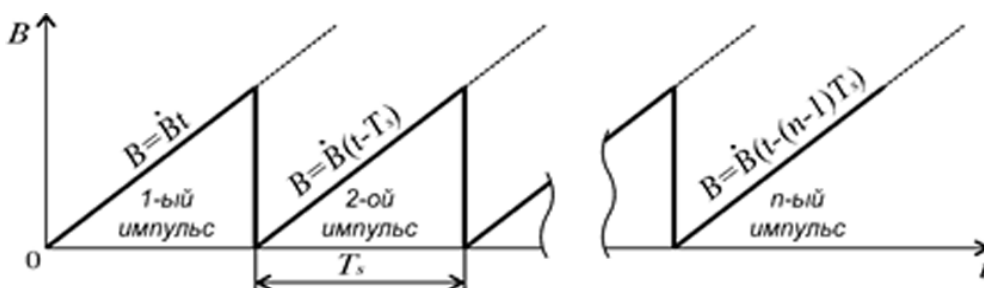


Рис. 2. Временная зависимость величины магнитного поля в спиновых ротаторах

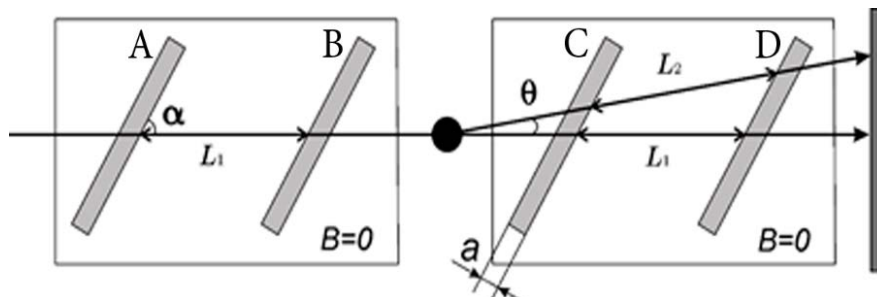


Рис. 3. Схема установки СЭМУРН с линейно растущими полями

В случае абсолютно упругого рассеяния на образце и отклонения траектории нейтрона на малый угол ( $\theta \ll 1$ ) разность фаз прецессии будет иметь следующий вид:

$$\Delta\Phi_{TGF} = \gamma\dot{B}[T_2\tau_2 - T_1\tau_1] = \gamma\dot{B} \frac{2aL_1\text{ctg}(\alpha)}{v_n^2\sin(\alpha)} \theta,$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – времена пролета через ротаторы первого и второго плеч соответственно;  $T_1,$

$T_2$  – времена пролета расстояния между ротаторами внутри первого и второго плеч соответственно.

Результирующий пучок нейтронов будет иметь следующую зависимость величины поляризации от длины волны:

$$P(\lambda) = \frac{\int_{\Omega} F \cos(\Delta\Phi_{TGF}) d\Omega}{\int_{\Omega} F d\Omega},$$

где интегрирование производится по области, доступной анализатору;  $F$  – форм-фактор образца, помещенного в установку. В случае малых углов можно записать  $Q = 2\pi \cdot \sin(\theta)/\lambda$  ( $\theta \ll 1$ ),

$$\Delta\Phi_{TGF}(\theta) = QZ_{TGF},$$

где величина

$$Z_{TGF} = \frac{1}{2\pi} 2\gamma B_{\max} f_{saw} aL \frac{m_n^2 \cos(\alpha)}{h^2 \sin(\alpha)} \lambda^3$$

называется спин-эхо длиной. Физический смысл спин-эхо длины – это характерный размер неоднородностей в образце. По экспериментально полученной зависимости поляризации от длины волны (спин-эхо длины) можно сделать выводы о том, какого размера и какой формы неоднородности встречаются в исследуемом образце.

#### Экспериментальная часть

В данном методе необходимо создать четыре области магнитного поля. Магнитное поле должно быть не стационарным, а линейно растущим во времени. Такая особенность позволяет увеличить чувствительность метода по сравнению с использованием стационарных полей. В качестве спиновых ротаторов

используются катушки прямоугольного сечения, сделанные из алюминиевого профиля, путем нарезки отдельных витков (рис. 4). Длина катушки 150 мм, количество витков 70 штук. Для того чтобы магнитное поле было замкнуто и не выходило за пределы катушки, каждая катушка помещается внутрь магнитопровода из стали марки АРМКО. Такая конструкция позволяет избавиться от выхода наружу магнитного поля, который приведет к деполяризации пучка.

Расстояние между катушками одного плеча 1 м, между соседними катушками разных плеч 10 см. Для снижения эффекта деполяризации пучка нейтронов необходимо подавить внешнее магнитное поле Земли. С этой целью спиновые ротаторы помещаются в защитный кожух из мю-металла, который также помещается в стальной тонкостенный кожух (рис. 5).

Как упоминалось ранее, для увеличения чувствительности к углу рассеяния спиновые ротаторы должны быть повернуты относительно оси спектрометра и составлять с ней острый угол. Однако в данном эксперименте, ввиду сложности выставления одинакового угла поворота для всех катушек, было решено выставить их перпендикулярно оси установки. Для создания импульсов магнитного поля использовались импульсы тока линейно растущие во времени с частотой 200 Герц. С целью уменьшения нагрева электроники и катушек питающие блоки создавали 20 треугольных импульсов, достаточных чтобы нейтроны с длиной волны 10 ангстрем могли успеть пролететь через действующее магнитное поле (рис. 6).

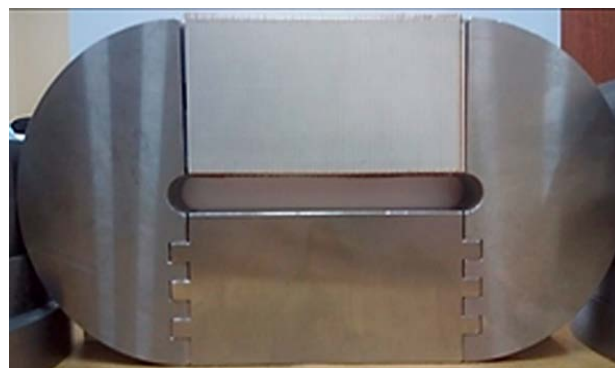


Рис. 4. Спиновый ротатор. Алюминиевая катушка помещена в магнитопровод для замыкания магнитного поля

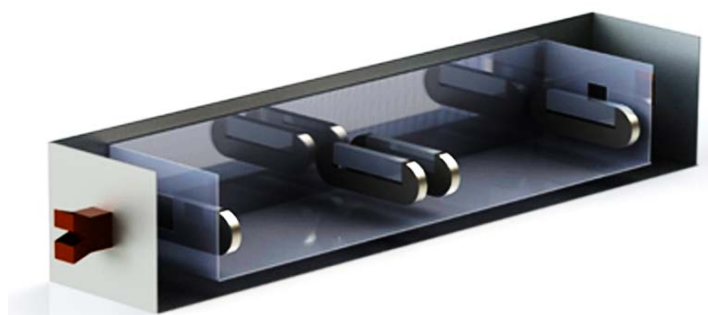


Рис. 5. Трехмерная модель установки СЭМУРН с линейно растущими магнитными полями



Рис. 6. Временная зависимость импульсов тока, протекающего в спиновых ротаторах

В данном эксперименте применялось два блока питания, каждый из которых запитывал пару катушек с максимальным током в импульсе 25 ампер. Стоит сказать, что уровень импульсов был смещен на величину 12.5 ампер в отрицательные значения. Таким образом, в нулевой момент времени ток величиной 12.5 ампер протекал в обратную сторону и в течение 5 ms линейно возрастал до величины 12.5 ампер. Большого значения тока достичь не удалось вследствие сильного перегрева катушек. Полученные токи позволили достичь поля амплитудой 150 Гаусс, тем самым создав временной градиент поля  $3 \cdot 10^4$  Гаусс/с. Такой величины градиента достаточно для измерения спин-эхо фокусировки на доступном расстоянии, но на порядок меньше, чем требуется для полноценного инструмента для структурных исследований [4]. В данном эксперименте для измерения фокусировки изменялось расстояние между ротаторами второго плеча (ротатор С перемещался от начального положения к ротатору D).

**Обсуждения и результаты**

Результатом эксперимента является зависимость поляризации пучка нейтронов

от расстояния между катушками одного плеча – спин-эхо фокусировка. Полученная зависимость хорошо аппроксимируется аналитической зависимостью. С помощью полученной зависимости и был оценен уровень магнитного поля, создаваемого в катушках.

$$\Delta\Phi = \gamma\dot{B}[T_{AB}\tau - T_{CD}\tau] = \gamma\dot{B}\tau \left[ \frac{L_{AB} - L_{CD}}{v_n} \right],$$

где  $T_{AB}, T_{CD}$  – время прохождения расстояния между ротаторами A и B, C и D соответственно;  $\tau$  – время пролета через спиновый ротатор. Тогда зависимость поляризации нейтронного пучка от разницы расстояний  $L_{AB}$  и  $L_{CD}$  должна иметь следующую зависимость:

$$P = \cos \left( \gamma\dot{B}\tau \left[ \frac{L_{AB} - L_{CD}}{v_n} \right] \right).$$

В первую очередь необходимо определить доступные для измерения спин-эхо фокусировки длины волн. Для этого было проведено измерение поляризации после прохождения нейтронами всей установки со спиновыми ротаторами, находящимися на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 7). В таком случае для всех нейтронов должна наблюдаться компенсация ларморовской прецессии, т.е.

пучок должен быть полностью поляризован. Однако в силу того, что импульсы тока не являются бесконечными во времени, возникают ситуации, в которых компенсация не происходит. Часть нейтронов, пролетая через спиновый ротатор, попадает на участок между со-

седними импульсами магнитного поля. Таким образом были выбраны следующие диапазоны длин волн для построения спин-эхо фокусировки: 1.29 – 1.61 Å (a), 1.82 – 2.07 Å (b), 2.31 – 2.52 Å (c), 2.8 – 2.96 Å (d) (рис. 8).

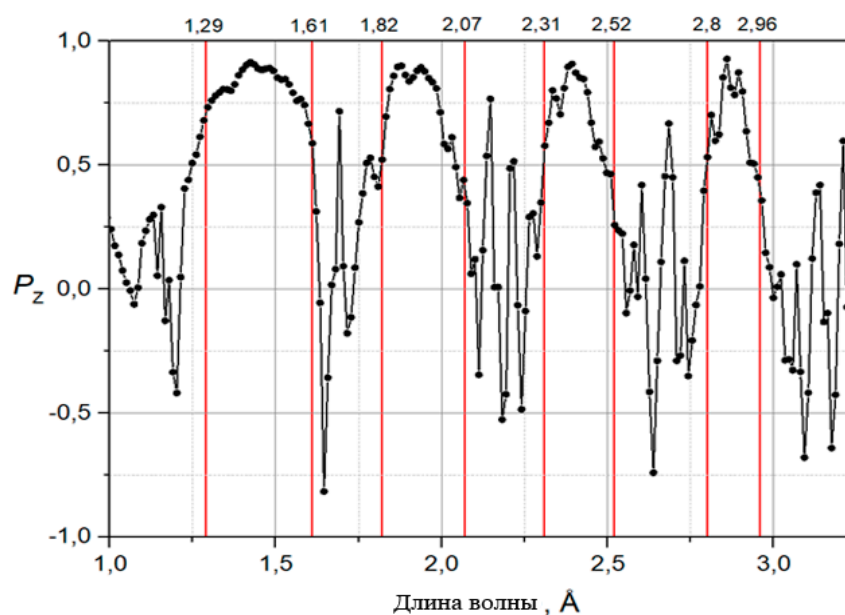


Рис. 7. Поляризация пучка нейтронов после прохождения всей установки. Области с поляризацией более 50% могут быть использованы для измерения спин-эхо фокусировки

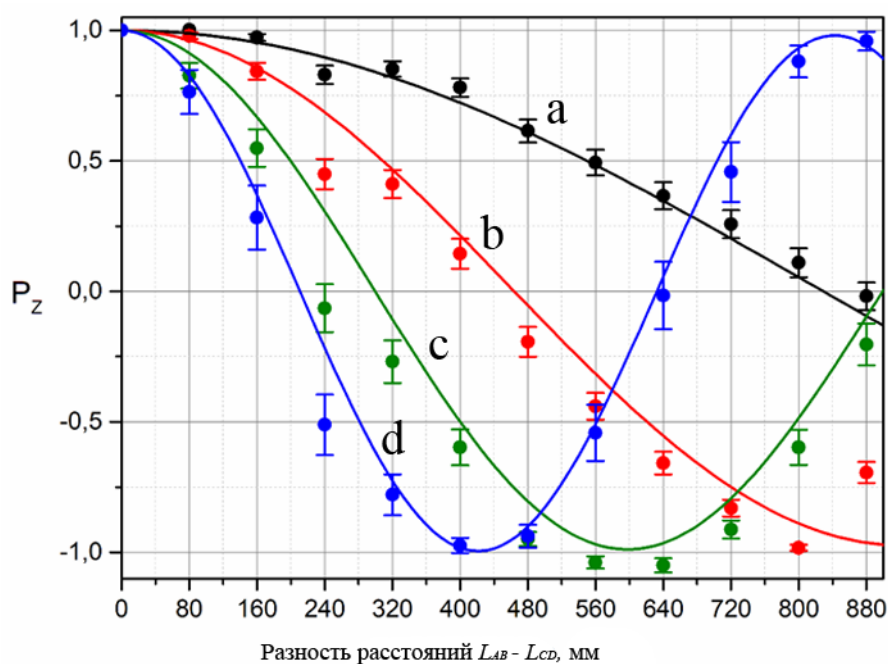


Рис. 8. Спин-эхо фокусировка, полученная для разных интервалов длин волн

### **Выводы**

В данном эксперименте была продемонстрирована работоспособность метода спин-эхо с градиентными магнитными полями. К сожалению, небольшой размер катушек и отсутствие охлаждения не позволили получить результат при высокой чувствительности инструмента к углу рассеяния. Для этого планируется создать катушки нового типа – с большим размером и большим сечением. Это приведет к меньшему нагреву и, как следствие, к увеличению магнитного поля. Увеличенный размер катушек позволит увеличить область магнитного поля, что линейно увеличит чувствительность. Не стоит забывать о том, что при увеличении геометрических размеров катушек требуется новый защитный кожух для подавления внешнего магнитного поля. Новый кожух необходимо сделать таким образом, чтобы катушки магнитного поля могли синхронно вращаться, создавая одинаковый угол с осью спектрометра. Это позволит менять чувствительность путем вариации

угла поворота катушек. В новых катушках будет предусмотрено водяное охлаждение, которое позволит увеличить токи в катушках, не опасаясь за их деформацию.

### **Библиографический список**

1. Mezei F. Neutron Spin Echo: A New Concept in Polarized Thermal Neutron Techniques // *Z. Phys.* 1972. № 255. P. 146–160.
2. Rekveldt M. Th. Novel SANS instrument using Neutron Spin Echo // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 1996. V. 114. P. 366.
3. Ioffe A. Spin-echo technique with time-gradient magnetic fields for small-angle neutron scattering and reflectometry // *Nuclear instruments & methods in physics research.* 2011. A 634. P. 55–58.
4. Bodnarchuk V. Expected performance of time-gradient magnetic field SESANS diffractometer at pulsed reactor IBR-2 / V. Bodnarchuk, V. Sadilov, S. Manoshin, R. V. Erhan, A. Ioffe // *Journal of Physics: Conference Series.* 2017. V. 862. Conference 1.

---

*Поступила в редакцию  
23.12.2019*