

УДК 52.084

СТРОИТЕЛЬСТВО УСТАНОВКИ СПИН-ЭХО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЙНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РЕАКТОРА ПИК

© 2022 г. Ю. О. Четвериков^{a, *}, Л. А. Аксельрод^a, С. В. Григорьев^a, В. Краан^b, А. А. Сумбатян^a, А. В. Нагорный^{c, d, e}, В. В. Тарнавич^a

^aПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ “Курчатовский Институт”, Гатчина, 188300 Россия

^bDelft Technical University, 2600 AA Delft, The Netherlands

^cОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

^dКиевский национальный университет им. Т. Шевченко, Киев, 03022 Украина

^eИнститут геохимии окружающей среды НАНУ, Киев, 02000 Украина

*e-mail: chetverikov_yo@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 25.03.2022 г.

Описано современное состояние реализации проекта строительства установки спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ПИК Петербургского Института ядерной физики НИЦ “Курчатовский институт”. В ходе выполнения проекта были проведены работы по математическому моделированию, конструированию и изготовлению макетов узлов установки. Проведена оптимизация как оптических элементов установки, так и конструкции магнитов прецессии. Разработанная модель магнитов прецессии лежит в основе конструкции, переданной для изготовления. Выполнены испытания модели радиочастотного адиабатического флиппера. Результаты испытаний демонстрируют работоспособность флиппера в диапазоне полей с индукцией от 5 до 66 мТл.

Ключевые слова: малоугловое рассеяние нейтронов, нейтронное спиновое эхо, субмикронная структура вещества.

DOI: 10.31857/S1028096022100065

ВВЕДЕНИЕ

Метод спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов (СЭМУРН) [1] существенно расширяет возможности традиционных методов малоуглового и ультрамалоуглового рассеяния. За счет высокой светосилы установок СЭМУРН при исследовании структуры вещества на масштабах от 100 нм до 40 мкм время измерений сокращается в несколько раз.

С использованием метода СЭМУРН решено множество экспериментальных задач как изучения материалов в широком диапазоне структурных масштабов от нескольких нанометров до нескольких микрон (фрактальные объекты, упаковка хроматина в ядре биологической клетки) [2–5], так и повышения эффективности измерений ультрамалоуглового рассеяния объектами с крупномасштабными (более 100 нм) неоднородностями (магнитные домены, фотонные кристаллы, коллоидные растворы) [6–8].

ПРИНЦИП РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ СЭМУРН РЕАКТОРА ПИК

Работа установки СЭМУРН заключается в следующем. Нейтроны, произведенные и терма-

лизированные в реакторе, поступают по нейтронно-водной системе к установке. Нейтронный импульс формируется двухдисковым прерывателем и детектируется во временных каналах, заданных стартовым сигналом прерывателя. Поляризационные зеркала пропускают нейтроны с одним спиновым состоянием (вдоль магнитного поля поляризатора) и поглощают нейтроны с другим состоянием. Прецессия поляризованных нейтронов начинается с вращателя поляризации, который поворачивает магнитный момент нейтрона на $\pi/2$ относительно ведущего поля ($\pi/2$ -вращатель). Работа прецессионных полей установки СЭМУРН проиллюстрирована на рис. 1. Траектория нейтронов проходит через первый и второй магниты первого плеча прецессии. В магнитном поле первого плеча прецессии каждый нейтрон приобретает свою уникальную фазу, которая зависит как от длины волны (энергии) нейтрона, так и от траектории в магнитном поле. Направление поля во втором плече меняется на противоположное.

Смена знака происходит на токовом экране, который расположен на границе между плечами и создает магнитное поле с таким резким перехо-

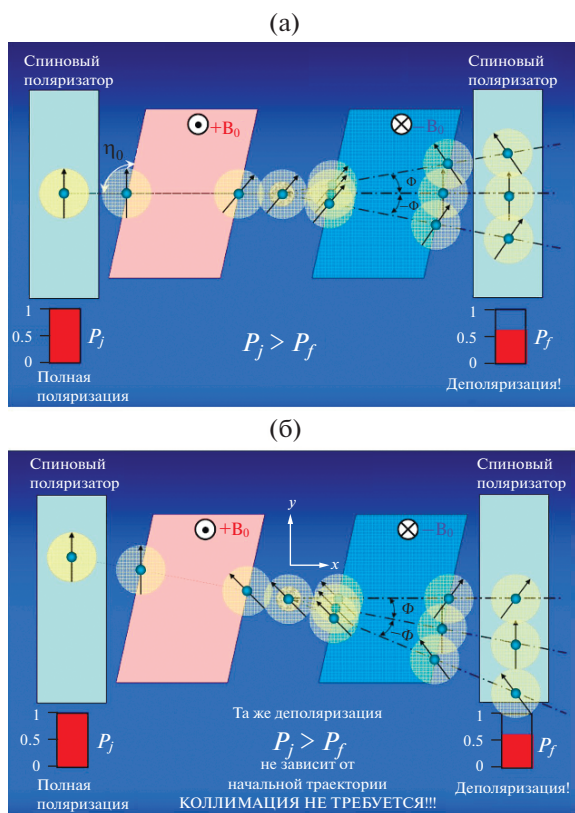


Рис. 1. Схема измерений СЭМУРН: а – изменение траектории нейтрона из-за рассеяния на образце приводит к деполаризации нейтронного пучка; б – деполаризация практически не зависит от коллимации нейтронного пучка.

дом, что нейтронная поляризация не следует за полем (не адиабатический переход). Во втором плече установки, идентичном первому, прецессия осуществляется в противоположном направлении.

Если в центре установки нет рассеивающего образца, то, пролетая во втором плече по траектории, аналогичной траектории в первом плече, нейтрон набирает ту же фазу прецессии, что и в первом плече. В конце второго плеча установлен $\pi/2$ -вращатель, после которого поляризация совпадает с начальной, и прецессия прекращается.

Изменение траектории нейтрона из-за рассеяния на образце приводит к тому, что траектории и фазы прецессии в первом и втором плечах установки становятся неэквивалентны, и фазовая неоднородность нейтронного пучка проявляется в деполаризации. Для того чтобы сигнал спин-эхо был максимально чувствителен к малым углам рассеяния на образце, конфигурация магнитного поля установки такова, что граница поля располагается под острым углом к падающему нейтронному пучку.

Параметры настройки совместно влияют на величину деполаризации и могут быть обобщены

параметром преобразования Фурье переданного импульса рассеяния – “длиной спинового эха” [1]:

$$\delta = \frac{m\gamma_n B L \lambda^2 \text{ctg}\theta_0}{2\pi h}, \quad (1)$$

где m и γ_n – масса и гиромангнитное отношение нейтрона; B – индукция магнитного поля магнита прецессии; L – протяженность области магнитного поля вдоль пучка; λ – длина волны нейтрона; θ_0 – угол наклона границы поля магнита относительно падающего пучка; h – постоянная Планка. Изменение поляризации, определяемое набором фаз прецессии рассеянных и нерассеянных нейтронов, выражается следующим образом [1]:

$$P'(\delta) = \frac{P_\delta}{P_0} = (1 - s) + s \langle P_{SC}(\delta) \rangle, \quad (2)$$

P_0 – поляризация прошедшего без рассеяния пучка, s – полное сечение рассеяния, $1 - s$ – доля нерассеянных нейтронов, $\langle P_{SC}(\delta) \rangle$ – средняя поляризация рассеянных нейтронов:

$$\langle P_{SC}(\delta) \rangle = \frac{1}{sk_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} S(\mathbf{Q}) \cos(zQ_\delta) d^2Q, \quad (3)$$

$S(\mathbf{Q})d^2Q$ – доля нейтронов, рассеянных в интервале волновых векторов $d^2Q = dQ_y dQ_z$ (y – горизонтальное направление, перпендикулярно оси пучка; z – вертикальное направление).

Измеряемая методом спин-эхо зависимость $P_{SC}(\delta)$ содержит фурье-преобразование проекции рассеяния $S_\delta(\mathbf{Q})$, однозначно определяемой функцией рассеяния образца $S(\mathbf{Q})$. Преобразование Фурье $S_\delta(\mathbf{Q})$ переводит процесс рассеяния из обратного пространства в прямое, и для упругого рассеяния (процесс без изменения энергии нейтрона при рассеянии) получим:

$$G_{SE}(\delta) = \frac{1}{4\pi^2} \int_V \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{R}) \exp(-i(\mathbf{QR} - Q_\delta \delta)) \times d\mathbf{R} dQ_y dQ_z, \quad (4)$$

где $G_{SE}(\delta)$ – корреляционная функция, которая является приведенной поляризацией нейтронного пучка $\langle P_{SC}(\delta) \rangle$, рассеянного образцом. Здесь косинус заменен на комплексную экспоненту, и в результате двустороннего интегрирования представленная синусом комплексная часть исчезает. После интегрирования по Q_z , z , Q_y и y и приняв $Q_x = 0$, получаем:

$$G_{SE}(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, 0, z) dx. \quad (5)$$

Видно, что такое представление $G_{SE}(\delta)$ соответствует проекции корреляционной функции образца $G(\mathbf{R})$ на направление z .

Техника спин-эхо для исследования малоуглового рассеяния нейтронов, в отличие от традиционной техники (регистрации рассеяния по небольшому угловому отклонению части хорошо коллимированного нейтронного пучка), использует принципы нейтронного спинового эхо для кодирования угла рассеяния независимым от коллимации первичного пучка способом. Таким образом, разрушается обратная связь между интенсивностью падающих нейтронов и разрешением установки. На практике это означает возможность измерения рассеяния образца на сверхмалые углы в пучке, угловая расходимость которого на порядки превышает исследуемый диапазон углов рассеяния.

В установке СЭМУРН ПИК реализована полевая конфигурация с радиочастотными флипперами. Пространственное расщепление нейтронных волн в данной конфигурации происходит за счет поглощения либо испускания виртуального кванта энергии радиочастотным полем катушек, настроенных в резонанс с ларморовской прецессией спина нейтрона.

В общих чертах описание работы плеча резонансной спин-эхо установки дано в [9]. Величина δ из уравнения (1) может быть описана как расстояние между двумя квантовыми состояниями нейтронной волны — со спином вдоль и против поля — после расщепления на скошенной границе поля. Попадая в радиочастотный флиппер, расщепленные волны обмениваются энергией с радиочастотным полем флиппера так, что квант энергии точно равен зеемановской разнице энергии между двумя спиновыми состояниями нейтрона в постоянном магнитном поле:

$$\hbar\omega_{RF} = -2\mu_n B, \quad (6)$$

причем амплитуда радиочастотного поля B_{RF} подбирается таким образом, что вероятность спинового переворота $p = 1$. Скорости нейтронных волн после прохождения флиппера не изменятся, а изменятся только их спиновые состояния. После прохождения флиппера волны продолжат расходиться с той же скоростью, что и до флиппера. На второй границе поля перевернутые нейтронные волны вновь изменят свою скорость. Разница в скоростях перевернутых волн возрастет на величину $2\Delta k$, поэтому после поля волны продолжат разлетаться с еще большей скоростью. Войдя во второй магнит плеча, части нейтронной волны вновь изменят свою скорость, так что разница в скоростях волн с разными спинами уменьшится. Пройдя через второй флиппер, который так же, как и первый, обменивается с нейтроном энергией радиочастотного поля, нейтронные волны, не меняя своей скорости, изменят спиновые состояния. При выходе из второго поля произойдет преломление, в результате которого скорости нейтронных волн сравняются, а пространственное разделение прекратится.

Пространственное разделение нейтронных волн соответствует “длине спинового эхо”, задаваемой для “классического” (нерезонансного) спинового эхо уравнением (1). В случае резонансного спинового эхо фаза “прецессии в нулевом поле” определяется не столько длиной магнитов, сколько расстоянием между ними. Поэтому для резонансного спинового эхо нет необходимости в создании протяженного поля магнитов. Резонансное спиновое эхо удобно реализовывать на установках с времяпролетной техникой измерений, когда в импульсе содержатся нейтроны широкого спектрального диапазона. В этом случае используется адиабатический радиочастотный флиппер [10] с мощным генератором радиочастотного поля [11].

Установку СЭМУРН планируется разместить на нейтроноводе НЗ-2 здания 104 реакторного комплекса ПИК. На рис. 2 приведена общая схема установки. На рисунке нейтронный пучок последовательно проходит путь от первой диафрагмы до детектора сквозь установку слева направо. Основные параметры СЭМУРН для реакторного комплекса ПИК приведены в табл. 1.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система установки (рис. 3) состоит из электромагнитов поля прецессии с расположенными в них радиочастотными адиабатическими флипперами, вращателей поляризации, катушек ведущего поля, токового экрана.

В межполюсном пространстве магнита создается вертикальное поле с индукцией от нуля до 0.1 Тл. Полюсные наконечники магнита имеют форму параллелограмма с острым углом 33.5° . Магниты расположены так, что ось пучка проходит через центр магнита под тем же острым углом к границе поля. Магниты расположены попарно в каждом плече на расстоянии около 1.5 м. В межполюсный зазор каждого магнита помещен адиабатический радиочастотный флиппер с катушками градиентного и радиочастотного полей. Градиентное поле (тоже вертикального направления) с амплитудой порядка 5–10 Гс создается токами в специальной системе проводников. Для создания радиочастотного поля (амплитуда 10–15 Гс) используется соленоид прямоугольного сечения с осью, совпадающей с осью пучка. Соленоид подключен к генератору радиочастотного тока, который обеспечивает токи амплитудой около 6 А в диапазоне от 50 кГц до 3 МГц [12].

Адиабатический $\pi/2$ -вращатель поляризации обеспечивает поворот вектора поляризации на 90° относительно ведущего поля. Вращатель представляет собой комбинацию из шести обмоток, размещенных в магнитном экране и обеспечивающих различные варианты плавного перехода полей от одной оси координат к другой с неадиабатической границей между полями. Обмотки, обеспечивающие поля в плоскости, перпендику-

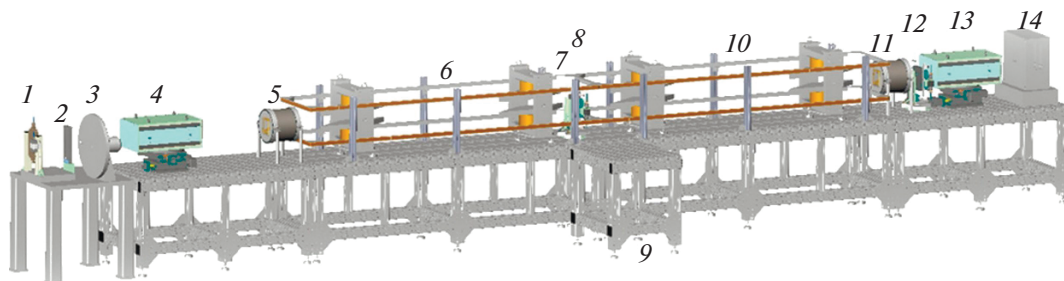


Рис. 2. Схема установки СЭМУРН ПИК: 1 – монитор с диафрагмой; 2 – заслонка; 3 – прерыватель; 4 – поляризатор; 5 – первый $\pi/2$ -вращатель; 6 – первое плечо прецессии; 7 – диафрагма образца; 8 – токовый экран; 9 – столик образца; 10 – второе плечо прецессии; 11 – второй $\pi/2$ -вращатель; 12 – диафрагма анализатора; 13 – анализатор; 14 – детектор.

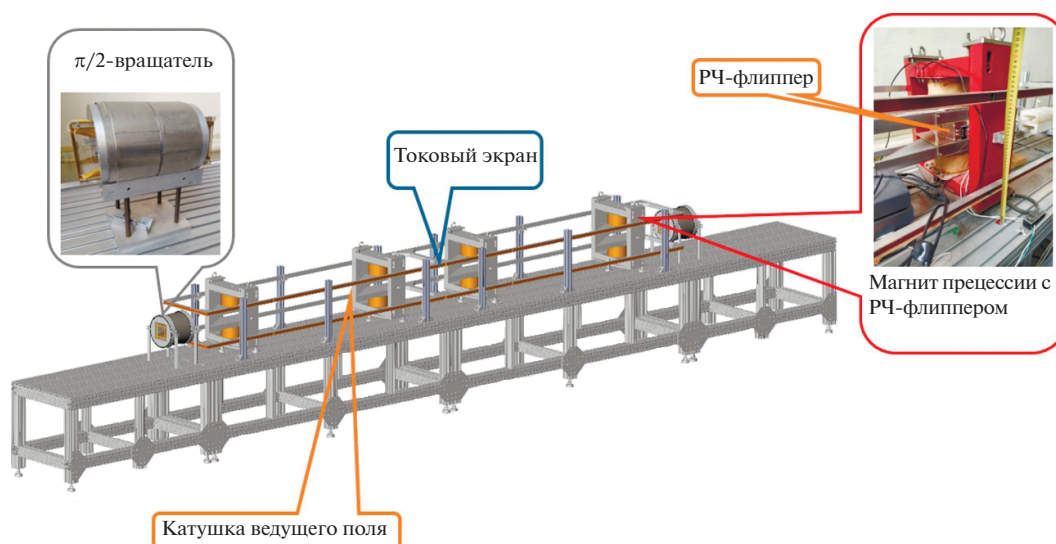


Рис. 3. Магнитная система установки СЭМУРН ПИК.

лярной пучку, имеют V-образную форму и изготовлены из алюминиевых проводов (для уменьшения поглощения нейтронов).

Ведущее магнитное поле (порядка 1 мТл) создается парой прямоугольных катушек с размерами $30 \times 500 \times 2500$ мм, расположенных выше и

ниже пучка на расстоянии около 400 мм друг от друга. Поле, создаваемое такими катушками, достаточно однородно по сечению пучка. В плечах установки ведущие поля противоположно направлены.

В центре установки расположен токовый экран (field stepper). Это устройство необходимо для

Таблица 1. Физические параметры установки СЭМУРН ПИК

Диапазон длин волн, нм	0.35–1.2
Резрешение по длине волны $d\lambda/\lambda$	0.1
Диапазон измеряемых масштабов	100 нм–40 мкм
Диапазон магнитных полей основных магнитов, Тл	0–0.1
Режим сканирования	Времяпролетный режим; изменение поля основных магнитов
Диапазон частот переменных полей флипперов, МГц	0.15–3
Длина установки, м	8
Поляризующая эффективность поляризатора и анализатора	≥ 0.95
Максимальное сечение нейтронного пучка на образце, мм ²	10×10
Плоскость рассеяния	Горизонтальная
Детектор	Пальчиковый ЗНе

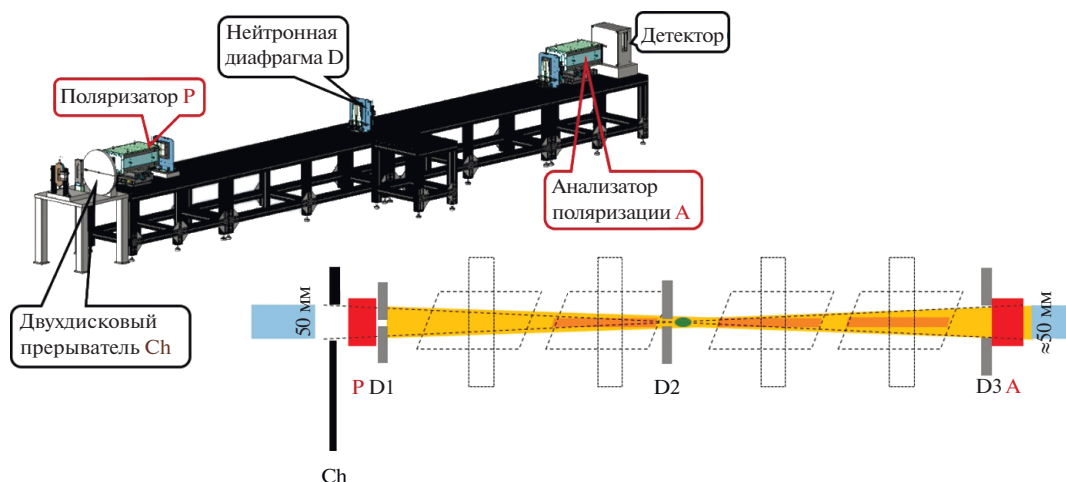


Рис. 4. Оптическая схема СЭМУРН.

формирования резкой (неадиабатической) магнитной границы при переходе от первого плеча ко второму. Токвый экран представляет собой фольгу с постоянным током. Максимальная индукция поля, создаваемого устройством, 0,7–1 мТл, градиент поля при переходе через границу порядка 14 мТл/см.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

Оптическая схема прибора изображена на рис. 4 и состоит из дискового прерывателя, поляризатора, анализатора, и трех комплектов коллимационных диафрагм (D1–D3). Размер входного окна диафрагмы D1 вблизи поляризатора (8 × 50 мм) ограничен размером рабочей области поля основных магнитов. Диафрагма вблизи образца D2 вырезает из нейтронного потока пучок сечением 8 × 10 мм². Размеры окна диафрагмы определяются максимальным сечением исследуемых образцов. Размер диафрагмы D3 вблизи анализатора 8 × 50 мм определяется минимальным измеряемым масштабом (ограничение 100 нм из-за рассеяния на больших углах и поглощения шторками диафрагмы). Пучок, сходящийся в горизонтальной плоскости от диафрагмы D1 размером 50 мм к диафрагме D2 размером 10 мм, потенциально способен увеличить поток нейтронов в пять раз по сравнению с параллельным пучком (10 мм D1 и 10 мм D2) и реализует возможность измерений малоуглового рассеяния в расходящемся нейтронном пучке.

Дисковый прерыватель предназначен для формирования нейтронного импульса, обеспечения времяпролетного режима измерений и оптимизирован для работы в диапазоне длин волн 3–12 Å с разрешением $\Delta\lambda/\lambda \sim 10\%$. Прерыватель представляет собой два диска, жестко закрепленных на одной оси. Ось прерывателя расположена сбоку от оси нейтронновода и параллельно ей. Рас-

стояние между дисками 1 м. Радиус дисков 250 мм. Каждый диск изготовлен из поглощающего нейтроны материала и имеет два сквозных окна. Диски развернуты так, что окна первого диска прикрываются вторым диском, образуя “оптически слепую” схему. Двухдисковый прерыватель в отличие от однодискового характеризуется почти постоянным разрешением $d\lambda/\lambda$ во всем измеряемом диапазоне длин волн λ и относительно высокой трансмиссией при больших λ . Полезной особенностью такой схемы является уменьшение прямого радиационного фона ионизирующего излучения от реактора. Узел перемещения прерывателя в случае необходимости измерений на прямом пучке позволяет полностью выводить прерыватель из пучка.

В качестве поляризующего элемента как поляризатора, так и анализатора используют V-образную суперзеркальную оптическую сборку (V-cavity): два плоских зеркала длиной 385 мм, расположенных буквой V с углом при вершине $\sim 0.9^\circ$ (два критических угла отражения). Ось пучка проходит по центральной линии сборки под углом 0.45° к каждому зеркалу. Линия соединения зеркал расположена горизонтально поперек оси пучка, как и магнитное поле (порядка 50 мТл), создаваемое системой постоянных магнитов, расположенных вокруг поляризатора и задающих направление поляризации. Поляризующие суперзеркала – нанесенные на обе стороны монокристаллической пластины (толщиной 0.3 мм) многослойные покрытия Fe/Si с отражающей способностью $m = 5$. Компонента с положительной поляризацией отражается от зеркал и уходит из пучка, а компонента с отрицательной поляризацией проходит через зеркало и используется в установке (размер зеркала 50 × 385 мм). Магнит с оптической сборкой располагается на юстировочном столе с двумя степенями свободы – возможно движение по горизонтали поперек пучка и вращение вокруг

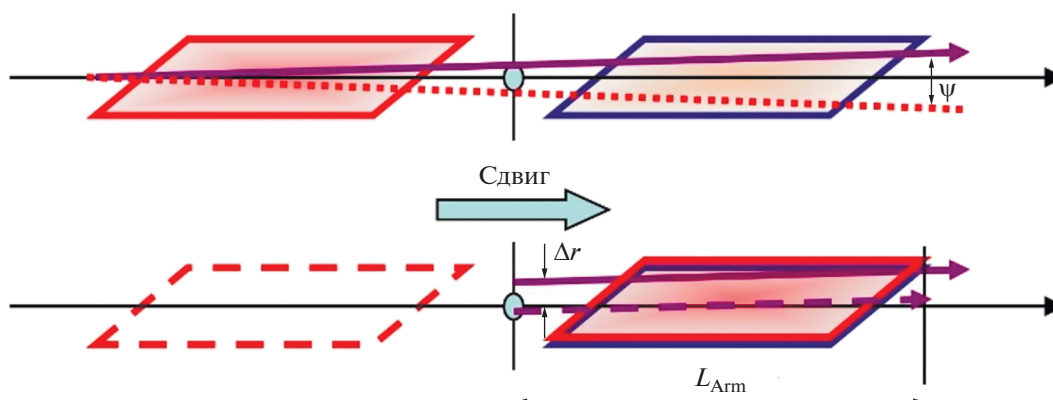


Рис. 5. Сопоставление траекторий в двух плечах прибора. Любые траектории, не параллельные оси прибора, не совпадают, и для них фазы в первом и втором плечах не равны друг другу.

вертикальной оси. Входные сечения как поляризатора, так и анализатора $10 \times 50 \text{ мм}^2$.

Радиационная защита вокруг прерывателя и поляризатора обеспечивает поглощение радиационного излучения, возникающего в процессе модуляции нейтронного пучка (поглощение нейтронов в дисках прерывателя, отражение нейтронов зеркалом поляризатора) до допустимых уровней.

Диафрагмы (D1–D3) предназначены для формирования размеров пучка по горизонтали и вертикали с помощью подвижных шторок с поглощающим нейтроны покрытием и автоматизированным регулированием расстояния между шторками. Горизонтальные и вертикальные шторки синхронно меняют свою позицию относительно центрального положения. Для обеспечения возможности совмещения оси устройства с осью пучка используются автоматизированные горизонтальные трансляторы, перемещающие узел диафрагмы поперек нейтронного пучка.

Узел образца меняется в зависимости от задачи, но включает в себя следующий базовый комплект: линейный транслятор перемещения в диапазоне 200 мм поперек пучка для автоматизированной смены образцов, стол с вертикальным перемещением в диапазоне 50 мм для расположения криостата или печки, допустимая нагрузка 50 кг. Все детали из магнитных материалов максимально удалены от пучка для исключения влияния поляризации на проводку.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА УСТАНОВКИ

Для повышения эффективности строящейся установки СЭМУРН реактора ПИК проведена работа по улучшению рабочих характеристик магнита прецессии и адиабатического резонансного флиппера. Эффективность работы установки может быть оценена исходя из экономии времени измерений. Необходимое время измерений

находят из дисперсии полезного сигнала [13] (разброс экспериментальных точек вокруг значений, находящихся на кривой рассеяния G_{SE}), которая убывает с набором статистики:

$$D(G_{SE}) = \frac{1 + (s(G_{SE} - 1) + 1)^2(1 - 2P_0^2)}{tI_{SE}s^2P_0^2}, \quad (7)$$

где t и I_{SE} – время измерений и интенсивность на образце. На величину $D_1(G_{SE})$ существенно влияет степень поляризации P_0 . Наиболее сильно это влияние проявляется при малой доле рассеянных нейтронов (s).

Индукция магнитного поля B и длина области прецессии L определяют фазу прецессии как

$$\varphi \sim \sum B_{x,y,z} dL/dx, \quad (8)$$

где $B_{x,y,z}$ – индукция поля в точке траектории с координатами x, y, z (суммирование выполняется по всей траектории от начала до конца области прецессии), а величина $\sum B_{x,y,z} dL/dx$ является полевым интегралом (BL) магнитов вдоль траектории полета нейтрона. В процессе измерений спин-эхо прибор настраивается таким образом, чтобы фаза в первом плече прибора φ_I была равна фазе во втором плече φ_{II} , что ведет к нулевой фазовой разнице после второго плеча: $\varphi_{I-II} = \varphi_I - \varphi_{II} = 0$. Тогда поляризация на выходе из прибора P_f равна поляризации на входе в прибор P_i . Однако из-за неоднородности поля по сечению пучка для траекторий, не параллельных оси прибора, условие $\varphi_{I-II} = 0$ не выполняется. Происхождение фазы φ_{I-II} показано на рис. 5. Прибор спин-эхо можно представить как систему с трансляционной симметрией. Если выполнить операцию трансляции, то плечи I и II совмещаются друг с другом. Видно, что отклонение нейтрона от оси прибора на угол ψ ведет к несовпадению траекторий первого и второго плечей с расстоянием между траекториями Δr . В случае неоднородности поля внутри магнита ($B_{x,y,z} \neq \langle B \rangle$) появляется деполаризация ($P_f < P_i$), ухудшающая качество измерений. Повы-

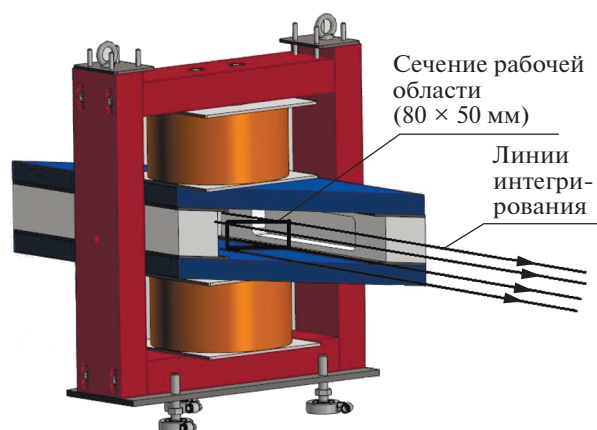


Рис. 6. Эскиз электромагнита установки СЭМУРН ПИК.

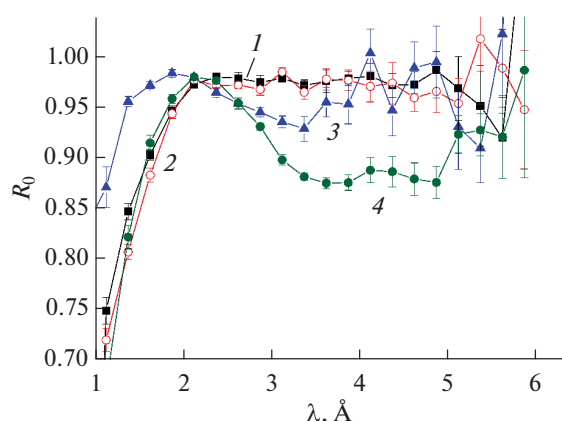


Рис. 7. Зависимость вероятности переворота спина флиппера от длины волны нейтрона: 1 – $f = 150$ кГц, $B = 4.9$ мТл; 2 – $f = 365$ кГц, $B = 12$ мТл; 3 – $f = 1$ МГц, $B = 33.1$ мТл; 4 – $f = 2$ МГц, $B = 66$ мТл.

шение однородности полевого интеграла магнитов прецессии позволяет улучшить поляризацию P_f и таким образом сократить время измерений.

В ходе создания установки была проделана работа по моделированию магнита и оптимизации однородности полевого интеграла. В результате

проделанной работы был разработан магнит (рис. 6) с улучшенными магнитными характеристиками (табл. 2). Запущен процесс производства разработанного электромагнита.

В конфигурации прибора СЭМУРН с адиабатическими радиочастотными флипперами на величину P_0 критически влияет также вероятность спинового переворота ρ во флипперах. Поскольку адиабатический флиппер работает в каждом из четырех магнитов, выполняется $P_0 \sim f(\rho)^4$.

Конструкция флиппера была протестирована на нейтронной станции REFLEX исследовательского реактора ИБР-2 (Дубна). На рис. 7 показана зависимость вероятности переворота спина ρ от длины волны нейтрона. Видно, что с увеличением длины волны от 1 до 2.2 Å эффективность переворота спина достигает максимального значения 0.975 для всех четырех измеренных частот (полей) настройки флиппера. На частотах 150 и 365 кГц в диапазоне λ от 2.2 до 6 Å вероятность переворота спина остается максимальной, изменяясь только в пределах статистического отклонения измерений, в то время как в случае высоких частот 1 и 2 МГц эффективность переворота спина уменьшается при $\lambda > 2.2$ Å. На частоте 1 МГц минимальная эффективность 0.93 соответствует $\lambda = 3.4$ Å, на частоте 2 МГц широкий минимум 0.88 простирается от $\lambda = 3.5$ до 5 Å.

Проведенный эксперимент показал, что несмотря на выявленную высокую эффективность переворота спина 0.975 (в точке настройки $\lambda = 2.2$ Å) в диапазоне частот (полей магнита прецессии) от 150 до 365 кГц, обнаруженное снижение эффективности переворота спина до 0.9 в длинноволновой части спектра на частотах 1 и 2 МГц значительно снижает общую эффективность установки СЭМУРН. По результатам экспериментальной работы в конструкцию флипперов внесен ряд изменений, тестирование новой конструкции запланировано на конец октября 2022 г.

Таблица 2. Характеристики электромагнита установки СЭМУРН для реактора ПИК

Индукция магнитного поля в центре воздушного зазора, Тл	0–0.1
Воздушный зазор (межполюсное расстояние), мм	90
Величина полевого интеграла BL , Тл · м	0.066 ± 0.004
Рабочая область $\Pi \times B$, мм × мм	50×8
Однородность полевого интеграла $\Delta BL/BL(x, y)$ в рабочей области, Тл · м	$\leq 2.5 \times 10^{-4}$
Ширина магнита, мм	≤ 570
Высота магнита, мм	≤ 740
Направление магнитного поля	Вертикальное
Масса электромагнита, кг	≤ 500
Угол наклона линий равного по величине поля относительно линий интегрирования, град	33.5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На конец сентября 2021 г. выполнен весь комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию прибора СЭМУРН. Разработана большая часть рабочей конструкторской документации. Работы по оптимизации конструкции адиабатического радиочастотного флиппера планируется завершить в конце октября 2022 г. Ведутся закупки материалов и оборудования. Сборку узлов установки планируется завершить к осени 2022 г., монтаж установки — к декабрю 2022 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы благодарят Российский научный фонд (грант № 19-12-00363) за поддержку работы по прототипированию и аттестации конструкции радиочастотного адиабатического флиппера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rekveldt M.T., Plomp J., Bouwman W.G., Kraan W.H., Grigoriev S., Blaauw M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2005. V. 76. № 3. P. 033901.
2. *Iashina E.G., Filatov M.V., Pantina R.A., Varfolomeeva E.Y., Bouwman W.G., Duif C.P., Hondecker D., Popich V., Grigoriev S.V.* // *J. Appl. Crystallogr.* 2019. V. 52. № 4. P. 844.
3. *Iashina E.G., Velichko E.V., Filatov M.V., Bouwman W.G., Duif C.P., Brulet A., Grigoriev S.V.* // *Phys. Rev. E.* 2017. V. 96. № 1. P. 012411.
4. *Iashina E.G., Bouwman W.G., Duif C.P., Filatov M.V., Grigoriev S.V.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 862. № 1. P. 012010.
5. *Velichko E.V., Buyanov A.L., Saprykina N.N., Chetverikov Y.O., Duif C.P., Bouwman W.G., Smyslov R.Y.* // *Eur. Polymer J.* 2017. V. 88. P. 269.
6. *Velichko E.V., Chetverikov Y.O., Aksel'rod L.A., Zabenkin V.N., Piyadov V.V., Sumbatyan A.A., Kraan W.H., Grigor'ev S.V.* // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2013. V. 7. № 3. P. 401.
7. *Grigoriev S.V., Chetverikov Y.O., Zabenkin V.N., Kraan W.H., Rekveldt M.T., Van Dijk N.* // *J. Appl. Crystallogr.* 2007. V. 40. № s1. P. s111.
8. *Kraan W.H., Zabenkin V.N., Chetveriko Y.A., Rekveldt M.T., Duif C.P., Grigoriev S.V.* // *Physica B.* 2007. V. 397. № 1–2. P. 79.
9. *Kraan W.H., Akselrod L.A., Yashina E.G., Sumbatyan A.A., Grigoriev S.V.* // *J. Sur. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2020. V. 14. № 1. P. S108.
10. *Grigoriev S.V., Kreuger R., Kraan W.H., Mulder F.M., Rekveldt M.T.* // *Phys. Rev. A.* 2001. V. 64. № 1. P. 013614.
11. *Bazhenov A.N., Lobashev V.M., Pirozhkov A.N., Slusar V.N.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 1993. V. 332. P. 535.
12. Патент № 2017100229 (РФ). Генератор переменного тока в катушке индуктивности. / ПИЯФ. Сумбатян А.А. // Патент России № 172332. Бюл. № 19. 04.07.2017.
13. *Четвериков Ю.О.* Развитие методики спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов для исследованного конденсированного состояния: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Санкт-Петербург: ПИЯФ РАН, 2011. 100 с.

Construction of a Spin-Echo Small-Angle Neutron Scattering Instrument for the PIK Reactor

Yu. O. Chetverikov^{1, *}, L. A. Akselrod¹, S. V. Grigoriev¹, V. Kraan²,
A. A. Sumbatyan¹, A. V. Nagorny^{3, 4, 5}, V. V. Tarnavich¹

¹*Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina, 188300 Russia*

²*Delft Technical University, 2600 AA Delft, The Netherlands*

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

⁴*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 03022 Ukraine*

⁵*Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 02000 Ukraine*

*e-mail: chetverikov_yo@pnpi.nrcki.ru

The current state of the implementation of the project for the building of a spin-echo instrument for small-angle neutron scattering at the PIK reactor of the St. Petersburg Nuclear Physics Institute of the National Research Center "Kurchatov Institute" is described. In the course of the project, work was carried out on mathematical modeling, design and manufacture of mock-ups of the instrument units. Both the optical elements of the setup and the design of the precession magnets were optimized. The developed model of precession magnets underlies the design submitted for manufacturing. The model of a radio-frequency adiabatic flipper was tested. The test results demonstrate the flipper performance in the range of fields with induction from 5 to 66 mT.

Keywords: small-angle neutron scattering, neutron spin echo, submicron structure of matter.