

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМ. И.М. ФРАНКА

*На правах рукописи*



**Садилов Валентин Викторович**

**Развитие метода спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с  
линейно растущими магнитными полями для импульсного  
источника**

Специальность 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований

- Научный руководитель** – ***Боднарчук Виктор Иванович**, кандидат физико-математических наук, начальник научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2*
- Официальные оппоненты** – ***Четвериков Юрий Олегович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Отдел Эксплуатации Нейтронных Станций на реакторе ПИК, Отдел Исследования Конденсированного Состояния, НИЦ «Курчатовский Институт» - Петербургский институт ядерной физики*
- Кравцов Евгений Алексеевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией нейтронно-синхротронных исследований наноструктур, Институт физики металлов УрО РАН*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета ОИЯИ.04.01.2022.П,

кандидат физико-математических наук

Т.И. Иванкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Рассеяние нейтронов малой ( $< 1$  эВ) энергии является удобным инструментом для исследований в области конденсированного состояния вещества, составляя основу отдельного методического направления – нейтронографии. Особенности взаимодействия таких нейтронов с ядрами различных элементов выделяют методы нейтронографии на фоне других методов исследования. Так, с помощью нейтронов можно изучать различные объекты, состоящие из разных изотопов одного и того же химического элемента, включая соединения, содержащие элементы как с сильно отличающимися атомными номерами, так и из элементов с близкими номерами. Для нейтронов доступно исследование органических соединений, изучение длины и формы водородных связей, определение положения атомов водорода. Так как нейтрон обладает ненулевым магнитным моментом, то может наблюдаться его взаимодействие с магнитным полем. Данное свойство позволяет изучать магнитные структуры. Особый интерес представляют и методы, в основе которых лежат особенности взаимодействия нейтронов с магнитными полями, в частности методы, основанные на эффекте спинового эха.

Спиновое эхо – явление повторного возникновения сигналов ядерной или электромагнитной индукции, обусловленное фазировкой спиновых магнитных моментов под действием радиочастотных импульсов. Данный эффект был открыт в 1950 году американским ученым Г. Ханом несколько лет спустя после открытия магнитного резонанса [1].

Метод нейтронного спинового эха (НСЭ) известен с 1972 г. после публикации Ф. Мезея [2]. В основе метода лежит явление ларморовской прецессии спина нейтронов в магнитном поле. Существует две области применения явления нейтронного спинового эха для исследований материалов. Первый – изучение динамики структуры, когда регистрируются малые изменения скорости нейтронов в результате неупругого рассеяния. Спин-эхо методика позволяет с разрешением, недоступным другим методам исследований, регистрировать изменение энергии нейтрона после взаимодействия с возбуждениями среды вплоть до  $10^{-7}$  эВ. Данный метод применяется для исследования явлений релаксации в магнитных системах, возбуждений в жидком гелии, диффузии, и многих других.

Вторая область применения – исследование крупномасштабных (субмикронных и микронных) неоднородностей в твердых телах и жидкостях. В этом случае спин-эхо эффект используется для точного определения сверхмалых углов рассеяния нейтронов. Метод спин-эхо позволяет работать со слабоколлимированными пучками нейтронов, что дает существенный выигрыш в интенсивности, по сравнению с традиционным малоугловым методом рассеяния при изучении крупных (с размерами порядка нескольких тысяч ангстрем) объектов. Для таких объектов, в случае традиционного малоуглового рассеяния, сильная коллимация приводит к большим потерям интенсивности. Метод, который содержит элементы как спин-эхо методики, так и малоуглового рассеяния, называется спин-эхо малоугловым рассеянием нейтронов (СЭМУРН). С помощью методики СЭМУРН можно исследовать образцы, недоступные или имеющие некоторые ограничения для традиционного малоуглового рассеяния. Результаты, полученные с помощью метода СЭМУРН представлены, например, в работах [3-7].

На данный момент хорошо развиты классические установки нейтронного спинового эха с постоянными магнитными полями и резонансными радиочастотными спин-флипперами. Такие установки используются на стационарных источниках нейтронов, например, в Техническом университете Делфта [8]. Реализация метода СЭМУРН на импульсных источниках позволит значительно расширить динамический диапазон измеряемых корреляционных длин в одном измерении за счет использования широкого диапазона энергий нейтронов. Одновременно с этим будет уменьшено экспериментальное время, необходимое для исследования одного образца. Однако, адаптация СЭМУРН методики к импульсным источникам нейтронов является довольно сложной задачей. Резонансные радиочастотные спин-флипперы, применяющиеся на монохроматических пучках, при использовании на импульсных источниках требуют дополнительной настройки полей во времени для каждого отдельного диапазона длин волн. Возможна и другая реализация – использование градиентного постоянного поля в дополнение к радиочастотному [9]. Не так давно были опубликованы работы по применению новой методики СЭМУРН, в которой используются пространственная модуляция нейтронного пучка (СЭММУРН) [10-13].

Настоящая работа посвящена развитию нового метода спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов, предложенного А. Иоффе и предполагающего применение линейно растущих во времени магнитных полей внутри четырех последовательных спиновых ротаторов [14]. Такой подход позволяет использовать широкий диапазон длин волн нейтронов на импульсных источниках, хотя и с некоторыми ограничениями.

### **Цели и задачи работы**

Целью данной работы является развитие метода спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов для применения на импульсном источнике нейтронов. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Создание численной модели спектрометра спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими магнитными полями (СЭМУРН-ЛРП) в программном пакете VITESS [15-19], использующим метод Монте-Карло. Проведение виртуальных экспериментов спин-эхо малоуглового рассеяния на однородных сферических частицах различных размеров и сравнение результатов с теоретическим расчетом. Оценки необходимых параметров установки для реализации в качестве полноценного инструмента исследований.
- Разработка и тестирование основных элементов СЭМУРН-ЛРП установки.
- Изучение влияния фоновых условий на реакторе ИБР-2 на качество получаемых экспериментальных данных с целью оптимизации условий эксперимента.
- Изучение возможных способов улучшения фоновых условий измерений методом времени пролета на реакторе ИБР-2.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана численная модель установки спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими магнитными полями (СЭМУРН-ЛРП) для импульсного источника нейтронов.
2. Разработаны и протестированы основные элементы установки СЭМУРН-ЛРП на импульсном реакторе ИБР-2.
3. Исследован эффект влияния фонового нейтронного излучения источника на экспериментальные данные на примере импульсного реактора ИБР-2.
4. Предложена и численно апробирована модель фильтра нейтронного пучка для улучшения фоновых условий измерений методом времени пролета.

### **Научная новизна работы**

- На основе разработанной численной модели СЭМУРН-ЛРП спектрометра на импульсном источнике нейтронов определены особенности метода при работе с пилообразными импульсами магнитного поля.
- Созданы и протестированы основные элементы СЭМУРН-ЛРП установки.
- Рассмотрены возможные вклады в фоновые условия на импульсном реакторе ИБР-2, включая сложную временную зависимость интенсивности источника (эффекты модулятора, запаздывающие нейтроны). Проведен анализ фоновых условий на установке РЕФЛЕКС реактора ИБР-2 и их влияние на измеряемые рефлектометрические кривые.
- Разработан фильтр нейтронного пучка для ограничения времени видимости поверхности замедлителя. Проведено Монте-Карло моделирование его работы.

### **Научная и практическая значимость работы**

Созданная численная модель СЭМУРН-ЛРП спектрометра может быть применена для дальнейшего изучения особенностей методики, проектирования и оптимизации спектрометров данного типа на импульсных источниках нейтронов. Проведенные тестирования основных элементов установки СЭМУРН-ЛРП на реакторе ИБР-2 указывают на работоспособность метода и являются существенным шагом в развитии метода для дальнейшей реализации на импульсных источниках нейтронов. Прделанные работы по изучению фоновых условий позволят повысить качество экспериментальных данных не только на создаваемом спектрометре, но и на других установках исследовательского реактора ИБР-2. Применение разработанного механического фильтра уменьшит долю нейтронов в пучке, излучение которых происходит случайным образом во времени и не коррелирует с импульсом источника, что приведет к улучшению отношения сигнал-шум в экспериментальных исследованиях.

## **Апробация работы**

Результаты исследований при работе над диссертацией докладывались на научных семинарах Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка ОИЯИ в Дубне, а также на следующих школах и конференциях:

- Central European Training School on neutron techniques (CETS-2016), Будапешт, Венгрия, 2-6 Мая 2016
- Первый Российский кристаллографический конгресс, Москва, Россия, 21-26 ноября 2016
- III International conference on small-angle neutron scattering (YuMO-2016), Дубна, Россия, 6-9 июня 2016
- 11. International Conference on Polarised Neutrons for Condensed Matter Investigations 2016 (PNCMI 2016), Фрайзинг, Германия, 4-7 июля 2016
- Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018, г. Санкт-Петербург, Петергоф, 17 - 21 сентября 2018
- Постер-сессия 47го программно-консультативного комитета по физике конденсированного состояния ОИЯИ 2018, 22-23 января 2018
- VII Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН–2018» Гатчина, мкр. Орлова роща, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 13-14 декабря 2018
- ECNS-2019, St. Petersburg, Russia, 30 июня – 5 июля 2019
- Конференция "Природа. Общество. Человек", университет Дубна, Дубна, 27-29 ноября 2019
- Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2020», Москва, 10-27 ноября 2020
- Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2021, Екатеринбург, 27 сентября - 01 октября 2021

## **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 5 работ в реферируемых журналах, которые входят в базу Scopus и РИНЦ, 1 патент.

## **Личный вклад автора**

Автор участвовал в создании численной модели спектрометра спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими магнитными полями (СЭМУРН-ЛРП) и модели рефлектометра для изучения и оценки фоновых условий в программном пакете VITESS, проведении расчетов в этих моделях. Автор принимал непосредственное участие в разработке и тестировании основных элементов установки СЭМУРН-ЛРП. В проведении модельных расчетов, обработкой результатов, в подготовке докладов и публикаций. Автором была проделана работа по моделированию фильтра нейтронного пучка и подготовке материалов для получения патента на изобретение.

## **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций автора и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 129 страниц, содержащих 66 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 94 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, аргументирована научная новизна и показана практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения.

**В первой главе** рассматриваются различные методы рассеяния поляризованных нейтронов с использованием ларморовской прецессии спина в магнитном поле. Рассматриваются основные принципы, используемые для формирования, управления, и анализа поляризованного пучка нейтронов. Показано, что эффект ларморовской прецессии спина открывает новые возможности для создания установок нейтронного рассеяния. С помощью новых методов достигается разрешение, недоступное для традиционных методов нейтронного рассеяния. Однако, их реализация довольно сложна, в связи с высокими требованиями к качеству поляризации нейтронного пучка и организации магнитного поля заданной геометрии. Тем не менее, развитие таких методов и создание принципиально новых установок для исследований позволят расширить область применения нейтронного рассеяния для получения структурных данных, недоступных для других методов.

**Во второй главе** рассматривается метод спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с использованием линейно растущего во времени магнитного поля (СЭМУРН-ЛРП). Дается теоретическое описание принципов работы метода, его особенностей и возможностей. Представлены результаты Монте-Карло расчетов, проведенных в численной модели спектрометра, созданной в программном пакете VITESS. Также представлены результаты нескольких тестирований основных элементов установки СЭМУРН-ЛРП. В заключении главы предлагаются пути улучшения характеристик основных элементов установки, и связанные с этим расчеты.

В 2011 году А. Иоффе был предложен новый метод СЭМУРН с использованием линейно растущего во времени магнитного поля (NSE-TGF или СЭМУРН-ЛРП) для реализации на импульсных источниках нейтронов [14]. Как и в любом методе НСЭ, в данном методе используется эффект ларморовской прецессии спина нейтрона в магнитном поле. Принципиально методика предполагает использование двух одинаковых плеч, в каждом из которых находится по две области прецессии спина с противоположным направлением магнитного поля (Рисунок 1а).

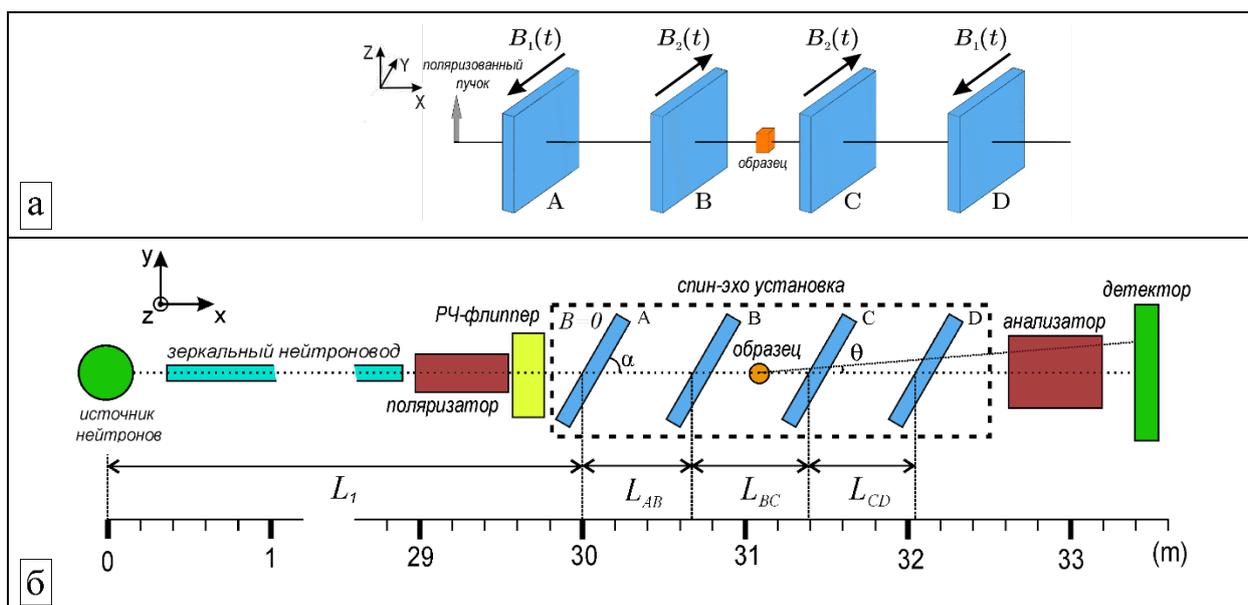


Рис. 1. а) Принципиальная схема установки СЭМУРН-ЛРП, которая была смоделирована в программном пакете VITESS. Голубые параллелепипеды отображают область магнитного поля внутри спиновых ротаторов. б) Схема тестирования основных элементов СЭМУРН-ЛРП установки на 9 канале реактора ИБР-2. Спиновые ротаторы помещены в защитный кожух из  $\mu$ -металла (магнитомягкий сплав), который в свою очередь помещен в металлический кожух для защиты от воздействия внешних магнитных полей.

Создаваемые поля противоположно направлены и линейно растут со временем. Для создания поля используются пилообразные импульсы тока (Рисунок 2), которые преобразуются в пилообразные импульсы магнитного поля в катушке спинового ротатора. Данный подход хорошо соотносится с импульсным источником нейтронов, и позволяет за один импульс источника использовать широкий диапазон энергий нейтронов (при условии соответствия длительности импульса тока и длительности времени измерения).

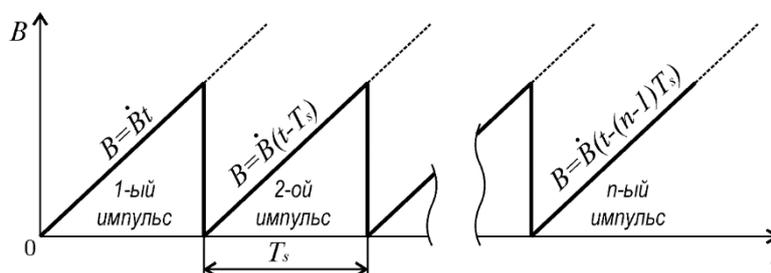


Рис. 2. Импульсы магнитного поля, создаваемые пилообразными импульсами тока. За начало отсчета времени берется старт импульса реактора.

Спин-эхо длина  $Z_{ЛРП}$ , характеризующая размеры пространственных корреляций в образце, в данном методе имеет вид:

$$Z_{ЛРП} = \gamma B_{max} f \frac{2\hbar a L c t g(\alpha)}{m_n v_n^3 \sin(\alpha)}, \quad (1)$$

где  $a$  - толщина спиновых ротаторов,  $\alpha$  - угол поворота ротаторов относительно оси инструмента,  $L$  - расстояние между ротаторами одного плеча,  $B_{max}$  – максимальная величина индуктивности магнитного поля,  $f$  – частота импульсов,  $m_n$  – масса нейтрона,  $v_n$  – скорость нейтрона.

Таким образом, поляризация для прошедшего через установку пучка будет иметь следующий вид:

$$\frac{P(Z_{ЛРП})}{P_0} = \exp[\tilde{G}(Z_{ЛРП}) - \tilde{G}(0)] = \exp\{\tilde{G}(0)[G_0(Z_{ЛРП}) - 1]\}, \quad (2)$$

где  $\tilde{G}(Z_{ЛРП}) = \frac{1}{k^2} \int_{-\infty}^{\infty} dQ_y \int_{-\infty}^{\infty} dQ_z S(Q) \cos(QZ_{ЛРП})$  – корреляционная функция для метода СЭМУРН с переданным импульсом  $Q=(0, Q_y, Q_z)$ ,  $k$  – импульс нейтрона, и  $G_0(Z_{ЛРП}) = \tilde{G}(Z_{ЛРП})/\tilde{G}(0)$ . Величина поляризации пучка нейтронов после рассеяния на образце (в случае 100% вероятности рассеяния) в зависимости от длины волны нейтронов будет иметь следующий вид:

$$P(\lambda) = \frac{\int F \cos(\Delta\Phi_{ЛРП}) d\Omega}{\int F d\Omega}, \quad (3)$$

где  $\Omega$  - телесный угол, в котором производится регистрация рассеянных нейтронов,  $F$  - формфактор частиц образца,  $\Delta\Phi_{ЛРП}$  - фаза ларморовской прецессии.

Метод спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов дает прямую информацию о структуре частиц в реальном пространстве без промежуточного Фурье преобразования и без использования обратного пространства [20]. Заметим, что согласно выражению (1), спин-эхо длина в рассматриваемом методе пропорциональна кубу длины волны. Это приводит к более высокому разрешению и увеличению доступного диапазона спин-эхо длин  $Z_{ЛРП}$  при одной и той же длине волны нейтронов по сравнению с методами, в которых используются постоянные и радиочастотные магнитные поля. В таких методах спин-эхо длина имеет квадратичную зависимость от длины волны [20].

Как видно из выражения (1), спин-эхо длина  $Z_{ЛРП}$  линейно зависит от величины временного градиента магнитного поля  $\dot{B}$  в спиновых ротаторах, от расстояния между ними  $L$  и их толщины  $a$ . Поэтому для достижения наилучшего разрешения следует использовать магнитное поле с максимально возможным временным градиентом, увеличивать расстояние между ротаторами и их толщину. Кроме того, из выражения (1) следует сильная зависимость от угла поворота ротаторов. Таким образом уменьшая угол между осью спектрометра и плоскостью ротаторов  $\alpha$  можно также увеличить разрешение установки и диапазон измеряемых спин-эхо длин  $Z_{ЛРП}$ .

Для изучения особенностей предлагаемого метода в программном пакете для моделирования нейтронных установок VITESS [15-19] была создана модель основного узла установки, включающего в себя четыре спиновых ротатора с размещенным в центре образцом, (Рисунок 1а). Выбранный программный пакет предлагает большой набор инструментов для моделирования магнитных полей (и соответственно поведения спинов нейтронов внутри) различных конфигураций.

В качестве источника использовался импульсный источник нейтронов с максвелловским распределением интенсивности по скоростям нейтронов и температурой замедлителя  $T = 300$  К и шириной импульса 280 микросекунд. Пучок нейтронов, выходящий из источника, поляризован вдоль оси  $OZ$ . Начало основного узла спин-эхо установки располагается на расстоянии 30 метров от источника. Толщина спиновых ротаторов  $a=2$  см, расстояние между

ними  $L=L_{AB}=L_{BC}=L_{CD}=83$  см друг от друга, и расположены под углом  $\alpha=10^\circ$  к оси спектрометра. В ротаторах задаются магнитные поля в плоскости  $XU$ , линейно растущие во времени от нуля до  $B_{\text{макс}} = 800$  Гаусс с периодом  $T_s = 5$  мс. Модуль образца (монодисперсные шарики радиусами от 100 до 6000 ангстрем) находится между ротаторами В и С. После спин-эхо установки расположен модуль монитора, который настроен на измерение поляризации в зависимости от длины волны нейтрона.

Данный виртуальный инструмент является идеализированным, так как в нем не учитываются потери потока нейтронов при использовании поляризатора, анализатора, нейтронотода и эффективность детекторной системы (более детальная схема представлена на рисунке 16.). Также отсутствуют внешние магнитные поля, которые вносят свой вклад в величину ларморовской прецессии. Однако такой инструмент позволяет изучить принципы работы новой методики СЭМУРН с линейно растущими магнитными полями. С помощью данной модели удалось выявить некоторые особенности предлагаемого метода: «многорежимность» и угловую зависимость чувствительности метода.

Для корректной работы установки СЭМУРН-ЛРП, необходимо, чтобы нейтроны пролетали спиновые ротаторы в момент линейного роста магнитного поля. Ситуации, когда в момент пролета одного из ротаторов происходит скачок магнитного поля (стык двух соседних импульсов) нужно исключить из рассмотрения в силу того, что в таком случае возникает неопределенная добавка к фазе. Таким образом, появляются некоторые области энергий нейтронов, в которых нельзя провести измерения в силу данного факта. В принципе, решить эту проблему можно. Для этого потребуется провести дополнительные измерения, и внести некоторый сдвиг по времени начала импульсов магнитного поля относительно импульсов источника, чтобы те нейтроны, которые проходили через ротаторы в момент скачка, стали попадать на линейный рост поля.

В случае, если нейтроны пролетают через спиновые ротаторы в момент действия разных магнитных импульсов, появляется некоторая добавка к фазе ларморовской прецессии, которая зависит от номеров импульсов поля. Наглядно такой эффект “многорежимности” можно изобразить на следующей схеме (Рисунок 3).

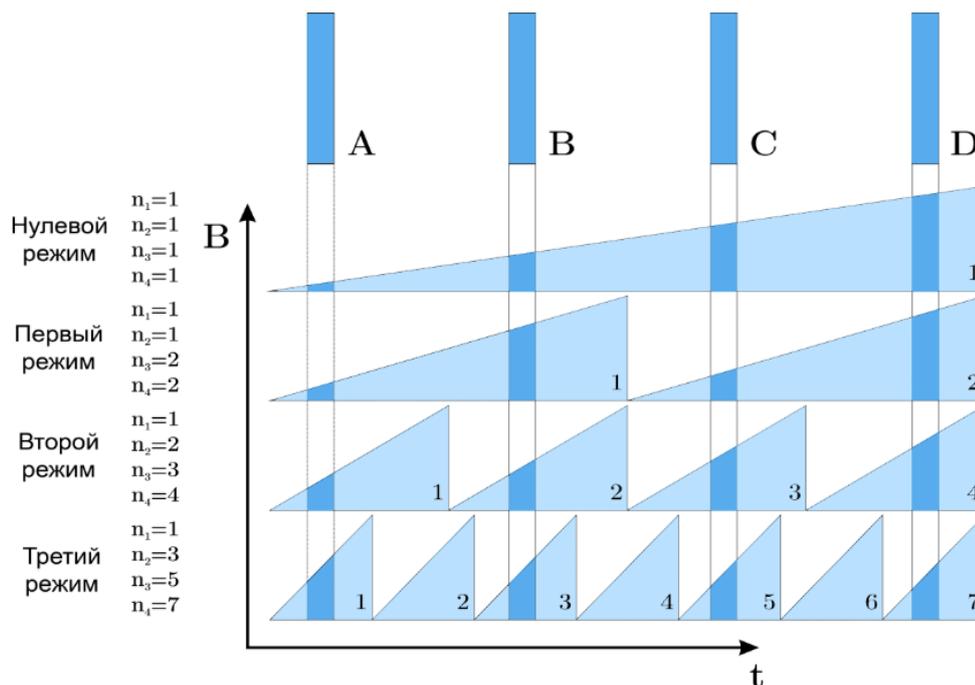


Рис. 3. Схема “многорежимности” работы установки СЭМУРН с линейно растущими магнитными полями. Символы  $n_1, n_2, n_3, n_4$  - обозначают номера импульсов магнитного поля, которые приходятся на соответствующие им спиновые ротаторы.

Данный эффект многорежимности был впервые обнаружен в процессе проведенного моделирования и не рассматривался в работах автора метода. Добавка к фазе ларморовской прецессии появляется только в том случае, когда на спиновые ротаторы одного плеча приходятся разные импульсы магнитного поля. Значит, нулевой режим и первый режим идентичны, в них данная добавка равна нулю. В других же случаях такая добавка приведет к тому, что данные, полученные при разных режимах, не будут совпадать, так как каждому режиму соответствует своя добавка к фазе. Это значит, что каждому диапазону длин волн, будет соответствовать свой режим работы.

Как отмечалось ранее, высокая чувствительность поляризации к углу рассеяния достигается за счет наклонных границ областей прецессии. Однако это дает максимальную чувствительность к углу рассеяния только в одной выделенной плоскости рассеяния – в плоскости, перпендикулярной к оси вращения спиновых ротаторов. По мере отклонения траектории рассеяния от этой плоскости чувствительность ослабевает и для рассеяния в плоскости перпендикулярной к выделенной становится практически нулевой (Рисунок 4а).

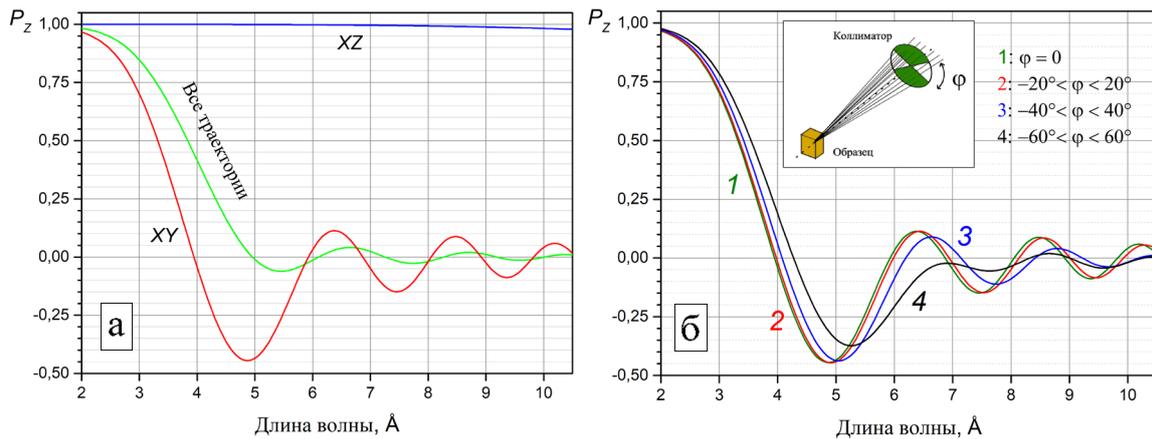


Рис. 4. а) Результаты теоретических расчетов при рассеянии на монодисперсных шариках радиусом  $R=100 \text{ \AA}$  в различных плоскостях. В случае учета всех направлений, кривая поляризации имеет все характерные особенности, которые значительно подавлены по сравнению с рассеянием в плоскости  $XU$ . б) Кривые рассеяния, рассчитанные по формуле (3) для разных телесных углов, определяемых азимутальным углом  $\varphi$ , который отсчитывается от горизонтальной плоскости  $XU$  (см. вставку).

Можно отметить, что в случае рассеяния в плоскости  $XZ$  чувствительность рассматриваемого метода к углу рассеяния практически отсутствует, в то время как в случае рассеяния в плоскости  $XU$  она максимальна. Если регистрировать все рассеянные нейтроны, то получаем некую среднюю зависимость  $P(\lambda)$  между двумя этими случаями. Поэтому, чтобы все особенности кривой рассеяния были более выраженными, имеет смысл производить селекцию рассеянных нейтронов по направлениям, оставляя нейтроны, рассеянные вблизи горизонтальной плоскости. Для наблюдения эффекта от селекции нейтронов было проведено два модельных эксперимента. В первом учитывались все рассеянные нейтроны (Рисунок 5а). Во втором была проведена секторальная коллимация пучка после рассеяния на образце (Рисунок 5б).

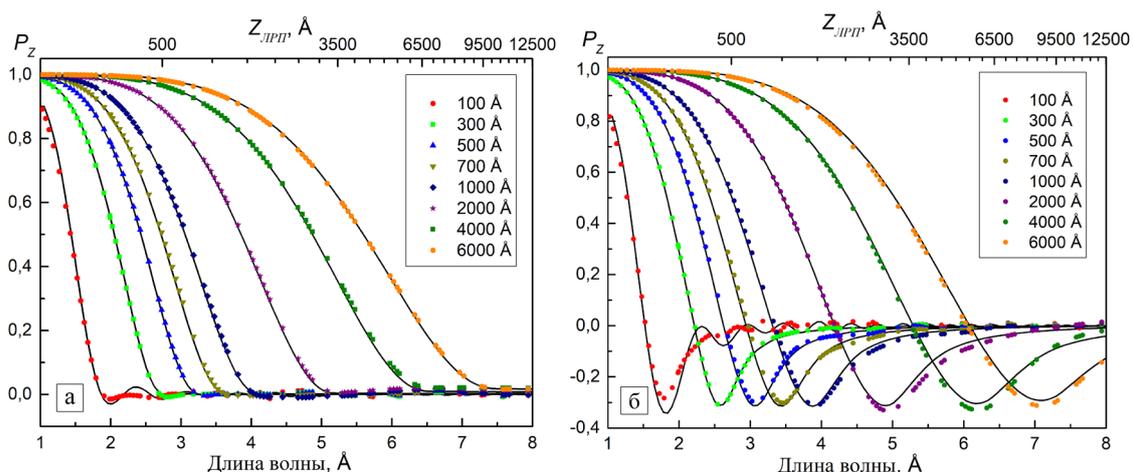


Рис. 5. Результат модельного эксперимента по рассеянию нейтронов на монодисперсных шариках различных размеров (Радиусы от 100 до 6000 ангстрем). а) В модели учитывались нейтроны, рассеянные во всех направлениях. б) В модели использовалось ограничение по азимутальным углам  $\varphi = \pm 45^\circ$ . Сплошная линия соответствует аналитическому расчету.

Тестирование основных элементов СЭМУРН-ЛРП установки проводилось на 9-м канале исследовательского реактора ИБР-2 (Рисунок 6). На этом канале действует нейтронный рефлектометр РЕФЛЕКС [21].

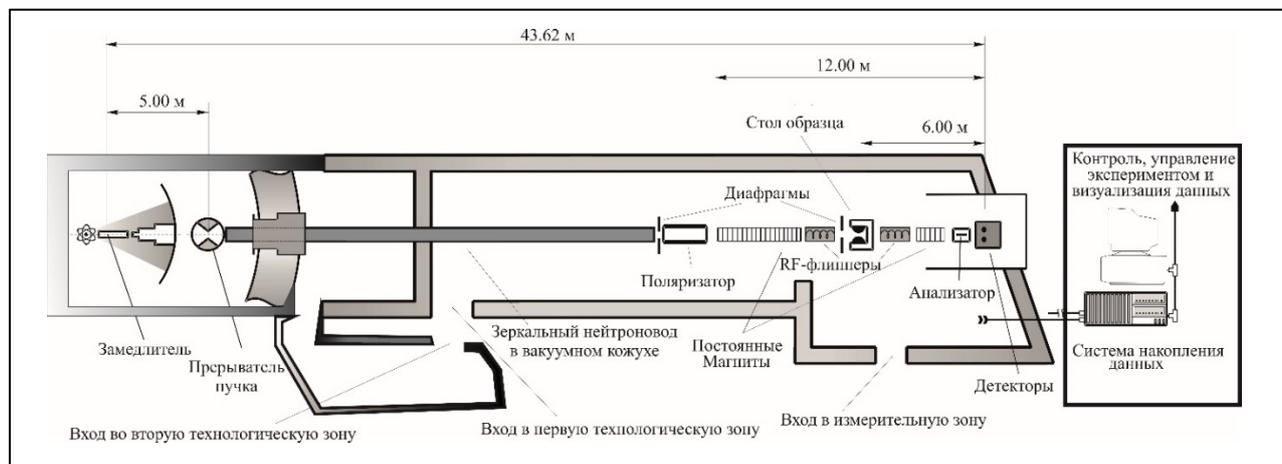


Рис. 6. Схема рефлектометра РЕФЛЕКС, расположенного на 9-м канале реактора ИБР-2. Оборудование, находящееся после поляризатора (стол образца, РЧ-флипперы, анализатор, постоянные магниты) может быть перемещено для установки элементов СЭМУРН-ЛРП спектрометра.

Источником нейтронов является импульсный быстрый реактор ИБР-2 [22, 23]. Для создания импульсов применяется два подвижных отражателя, которые генерируют импульс мощности в момент прохождения обоих рядом с активной зоной. Однако, между импульсами излучение нейтронов не прекращается, создавая тем самым непрерывное фоновое излучение (подробнее о временной структуре мощности реактора будет представлено в следующей главе). Для уменьшения количества таких нейтронов на расстоянии 5 метров от замедлителя установлен прерыватель пучка барабанного типа, с временным окном открытия 40 мс и пропускающий нейтроны от каждого импульса источника в диапазоне 1.4 – 10 ангстрем и поглощающий нейтроны вне этого окна. Далее за прерывателем начинается зеркальный изогнутый нейтронный провод длиной 24 метра. После нейтронного провода установлена регулируемая щель и сразу за ней поляризатор  $v$ -cavity типа, производства Swissneutronics [24]. После поляризатора с помощью постоянных магнитов формируется ведущее поле до первого РЧ-флиппера. Далее располагается СЭМУРН-ЛРП установка вместо стола образца установки РЕФЛЕКС и второго РЧ-флиппера.

Катушки, используемые для создания области магнитного поля внутри ротатора изготовлены из алюминиевого профиля прямоугольного сечения с толщиной стенки 2 мм и внешними размерами 80 мм x 30 мм. В профиле нарезаны отдельные витки шириной 2 мм методом электроэрозионной резки. Длина катушек 150 мм. Витки отделены друг от друга слоями термостойкой пленки из полиимида (Kapton) (Рисунок 7а).

Для того, чтобы магнитное поле было замкнуто и не выходило за пределы катушки, каждая катушка спинового ротатора помещается внутрь магнитопровода из стали марки АРМКО (или ТЧЖ – технически чистое железо) (Рисунок 7б). Сталь этой марки обладает малой

коэрцитивной силой и используется для изготовления сердечников электромагнитов. Такая конструкция позволяет сконцентрировать практически весь магнитный поток внутри сердечника и исключить появление рассеянных магнитных полей в области нейтронного пучка, что может приводить к его деполяризации.

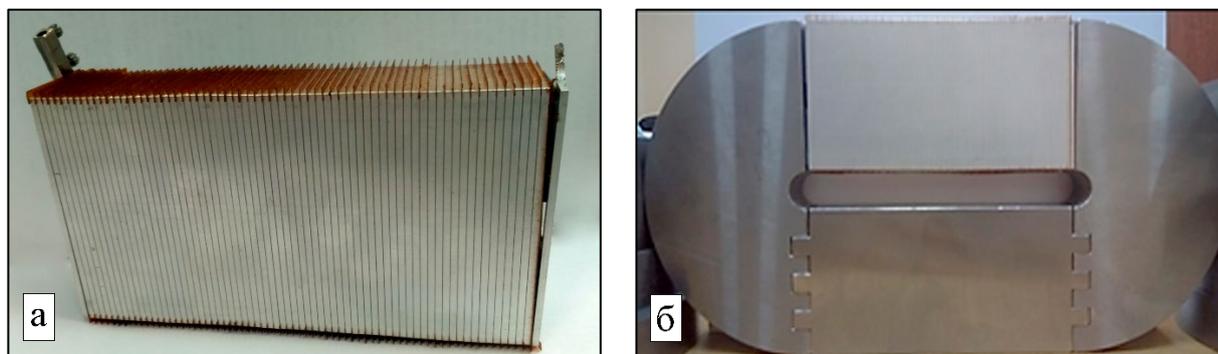


Рис. 7. а) Катушка спинового ротатора. Витки катушки отделяются друг от друга специальной самоклеящейся термостойкой полиимидной пленкой (Kapton) б) Спиновый ротатор в сборе. Алюминиевая катушка помещена в составной магнитопровод для замыкания магнитного поля.

Для создания импульсов магнитного поля, использовались импульсы тока, линейно растущие во времени с частотой 200 Гц и амплитудой 25 А. С целью уменьшения нагрева электроники и катушек питающие блоки создавали 20 треугольных импульсов, которых достаточно, чтобы нейтроны с длиной волны 10 Å успевали пролететь через действующее магнитное поле (Рисунок 8).



Рис. 8. Временная зависимость импульсов тока, протекающего в спиновых ротаторах.

Для питания катушек использовалось два усилителя сигналов, каждый из которых питал пару катушек пилообразными импульсами тока с амплитудой 25 А. Уровень, от которого начинался каждый импульс, находился на отметке  $-12.5$  А (Рисунок 8). Полученная конфигурация токов позволила достичь магнитного поля амплитудой 150 Гаусс, тем самым создав временной градиент поля 30000 Гаусс/с. Такой величины градиента достаточно для измерения спин-эхо сигнала на доступном в эксперименте расстоянии, но на порядок меньше, чем требуется для полноценного инструмента для структурных исследований [25]. Большого значения тока достичь не удалось вследствие сильного перегрева катушек. Также стоит

заметить, что в данном эксперименте спиновые ротаторы были установлены перпендикулярно оси пучка. Это связано со сложностью выставления одинакового угла для всех ротаторов на данном этапе создания установки.

Целью эксперимента было измерение зависимости поляризации пучка нейтронов от расстояния между катушками одного плеча – спин-эхо сигнала (изменялось расстояние между ротаторами второго плеча) и оценка эффективности использования магнитопровода из стали АРМКО. Измерение поляризации после прохождения нейтронного пучка через установку представлено на рисунке 9а. Это измерение позволило определить доступные интервалы длин волн, которые соответствуют тем нейтронам, которые пролетают через ротаторы в моменты линейного роста магнитного поля: 1.29 – 1.61 Å (1), 1.82 – 2.07 Å (2), 2.31 – 2.52 Å (3), 2.8 – 2.96 Å (4) (Рисунок 9). Измеренная спин-эхо фокусировка для полученных интервалов хорошо аппроксимируется аналитическим расчетом.

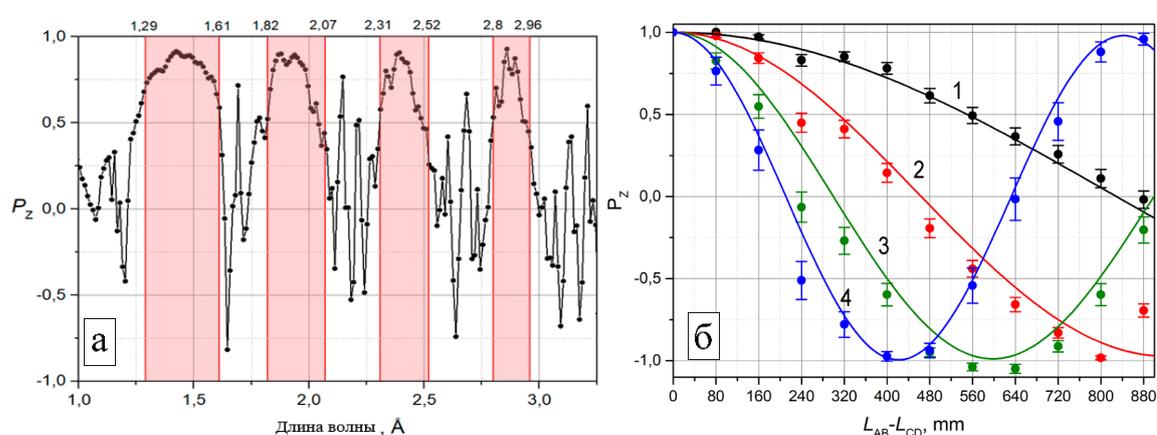


Рис. 9. а) Поляризация пучка нейтронов после прохождения всей установки. Области, отмеченные красным цветом с поляризацией более 50% были использованы для измерения спин-эхо фокусировки. б) Спин-эхо фокусировка, полученная для разных интервалов длин волн: 1) 1.29 – 1.61 Å, 2) 1.82 – 2.07 Å, 3) 2.31 – 2.52 Å, 4) 2.8 – 2.96 Å. Данные нормированы на 100% уровень поляризации.

Результаты экспериментов указывают на достаточную эффективность использования магнитопроводов из стали АРМКО. На данном этапе создания установки нагрев катушек ротаторов является ограничением, и не позволяет добиться большей чувствительности из-за невозможности достичь больших амплитуд пилообразных импульсов тока. Тем не менее был получен спин-эхо сигнал, демонстрирующий чувствительность поляризации пучка к разности пролетных расстояний в плечах спин-эхо установки, а значит и к углу рассеяния. Это подтверждает работоспособность предлагаемой методики, и дает возможность ее использования для создания инструментов нейтронного рассеяния. Для дальнейшего улучшения характеристик планируется создать катушки нового типа – с большим размером и большим сечением. Это приведет к меньшему нагреву, и как следствие, к возможности увеличить магнитное поле внутри катушек спиновых ротаторов. Увеличенный размер катушек позволит увеличить область магнитного поля, что линейно увеличит чувствительность. Также при увеличении геометрических размеров катушек, требуется новый защитный кожух, который бы покрывал все спиновые ротаторы 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 должно быть предусмотрено водяное охлаждение, которое позволит увеличить токи в катушках, не опасаясь за их высокий нагрев и возможную в результате этого деформацию.

**В третьей главе** представлены результаты исследования фоновых условий на реакторе ИБР-2. Методом Монте-Карло была построена численная модель установки рефлектометра с источником нейтронов, близким по параметрам к ИБР-2. Целью моделирования было изучить влияние фона запаздывающих нейтронов на результаты экспериментов по нейтронному рассеянию на установках и возможные пути улучшения условий измерений для повышения качества экспериментальных данных. Использование модели рефлектометра для этой задачи обусловлено простотой его реализации и выраженным эффектом от присутствия в пучке фоновых нейтронов, время излучения которых не коррелировано с основным импульсом мощности источника.

Для создаваемого прототипа СЭМУРН-ЛРП установки фоновые условия могут иметь важное значение. Использование поляризованного пучка изначально как минимум в 2 раза снижает его интенсивность. На это также накладываются конечные эффективности спин-флипперов, анализатора, поляризатора. Кроме того, пучок нейтронов в данной методике проходит через 4 катушки с общей толщиной алюминия порядка 3-4 сантиметров в зависимости от угла поворота. Все перечисленное приводит к ощутимому снижению интенсивности, особенно в области больших длин волн. Поэтому, можно ожидать, что измеряемый сигнал от рассеяния на образце может быть сильно искажен излучением фоновых нейтронов.

В исследовательском реакторе ИБР-2 импульсная структура нейтронного пучка достигается посредством модуляции реактивности активной зоны реактора с помощью вращающихся отражателей (Рисунок 10а). Таким образом формируются импульсы мощности реактора с периодом 200 мс и длительностью (FWHM) около 0.3 мс.

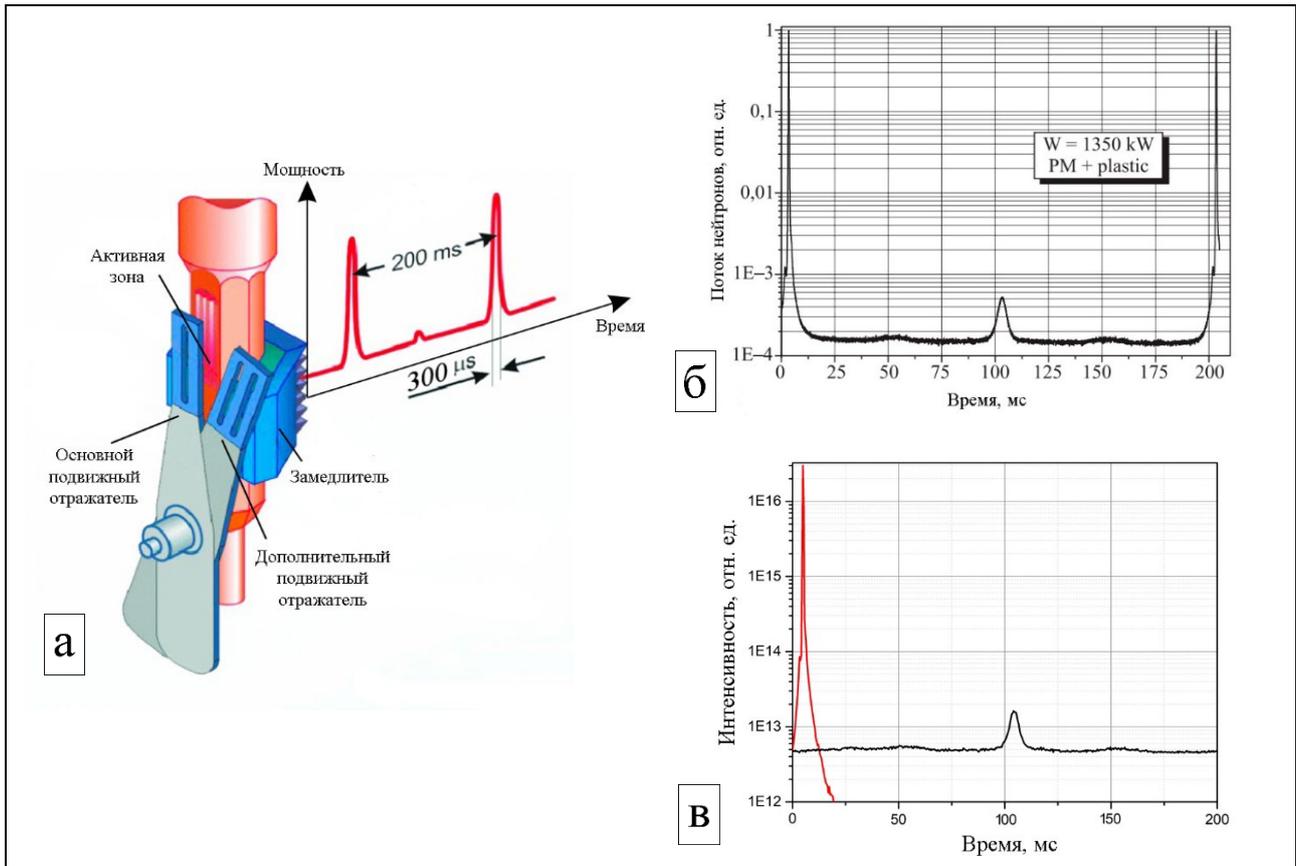


Рис. 10. а) Схема работы импульсного реактора ИБР-2. Периодический характер мощности достигается за счет использования двух подвижных отражателей. б) Временная структура мощности в течение одного периода повторения реактора. Измерения выполнены с помощью камеры деления с  $^{232}\text{Th}$ . в) Временная зависимость интенсивности модельного источника. Красная кривая соответствует импульсному источнику тепловых нейтронов, который излучает только нейтроны из основного импульса мощности реактора ИБР-2. Черная кривая соответствует квазипостоянному источнику тепловых нейтронов, который излучает нейтроны между основными импульсами мощности.

Между импульсами реактивности мощность сохраняется на уровне  $\approx 10\%$  от средней. Это является следствием непрерывного излучения запаздывающих нейтронов из активной зоны реактора в процессе деления ядер топлива  $^{239}\text{Pu}$ . Можно сказать, что импульсный реактор ИБР-2 представляет собой мощный импульсный источник нейтронов, совмещенный с относительно слабым стационарным реактором, излучающим, по сути, фоновые нейтроны, которые распространяются по тем же нейтронно-оптическим каналам, что и нейтроны из основного импульса реактора. Уровень этого фона составляет примерно  $10^{-4}$  от потока нейтронов в импульсе реактора (Рисунок 10б). В результате, запаздывающие нейтроны, время излучения которых не коррелировано с основным импульсом, в принципе могут вносить искажения в определение длины волны нейтронов по времени пролета.

Для оценки вклада запаздывающих нейтронов была создана модель источника нейтронов, состоящая из двух независимых замедлителей: первый замедлитель –

«импульсный» формирует импульс интенсивности с формой, представленной на рисунке 10в красным цветом. Второй замедлитель – «постоянный» излучает непрерывный поток нейтронов, формируемый запаздывающими нейтронами, излучаемыми между импульсами реактора – черным цветом.

Для нормировки потоков нейтронов от этих замедлителей, были использованы результаты измерений зависимостей потоков быстрых нейтронов реактора ИБР-2 от времени, приведенные в работе [23]. Поскольку время замедления быстрых нейтронов в веществе замедлителя очень мало, порядка 10 мкс [26], будем считать, что временная структура потока тепловых нейтронов после замедлителя совпадает с измеренной временной структурой потока быстрых нейтронов до их попадания в замедлитель.

Фоновые прерыватели, которые используются на установках реактора ИБР-2, существенно ограничивают возможность попадания нейтронов из фоновой подложки в детектор, но не позволяют избавиться от нее полностью. В модели был использован дисковый прерыватель с идеальной поглощающей способностью, окно которого представляет собой сектор с углом раствора  $36^\circ$ , соответствующий времени открытия 20 мс.

В качестве отражающего образца, устанавливаемого под разными углами скольжения  $\theta$  к падающему пучку нейтронов, была выбрана пленка из золота толщиной  $500 \text{ \AA}$  на кремниевой подложке. Размер образца выбирался таким образом, чтобы гарантированно перекрывать весь падающий на него пучок нейтронов. На рисунке 11 приведены результаты модельного эксперимента. Рисунки 11а и 11б демонстрируют времяпролетные зависимости интенсивности падающих пучков для импульсного и фонового замедлителей соответственно. Сплошные линии соответствуют случаю с использованием прерывателя пучка, пунктирные линии – случаю без его использования. Из этих результатов видно, что применение фонового прерывателя оказывает существенное влияние на спектральные характеристики пучка. На рисунке 11в продемонстрированы времяпролетные зависимости интенсивностей отраженных от образца пучков от обоих источников с применением прерывателя и без него. Этот рисунок наглядно демонстрирует, что при использовании фонового прерывателя, интенсивность отраженного пучка фонового источника составляет пренебрежимо малую часть в сравнении с интенсивностью от импульсного источника и не может оказать существенного влияния на спектральную зависимость отраженного пучка. Результаты, продемонстрированные на рисунке 11г подтверждают это тем, что коэффициент отражения  $R(q)$ , полученный от суммарной интенсивности обоих источников практически совпадает с аналогичной зависимостью только от импульсного источника.

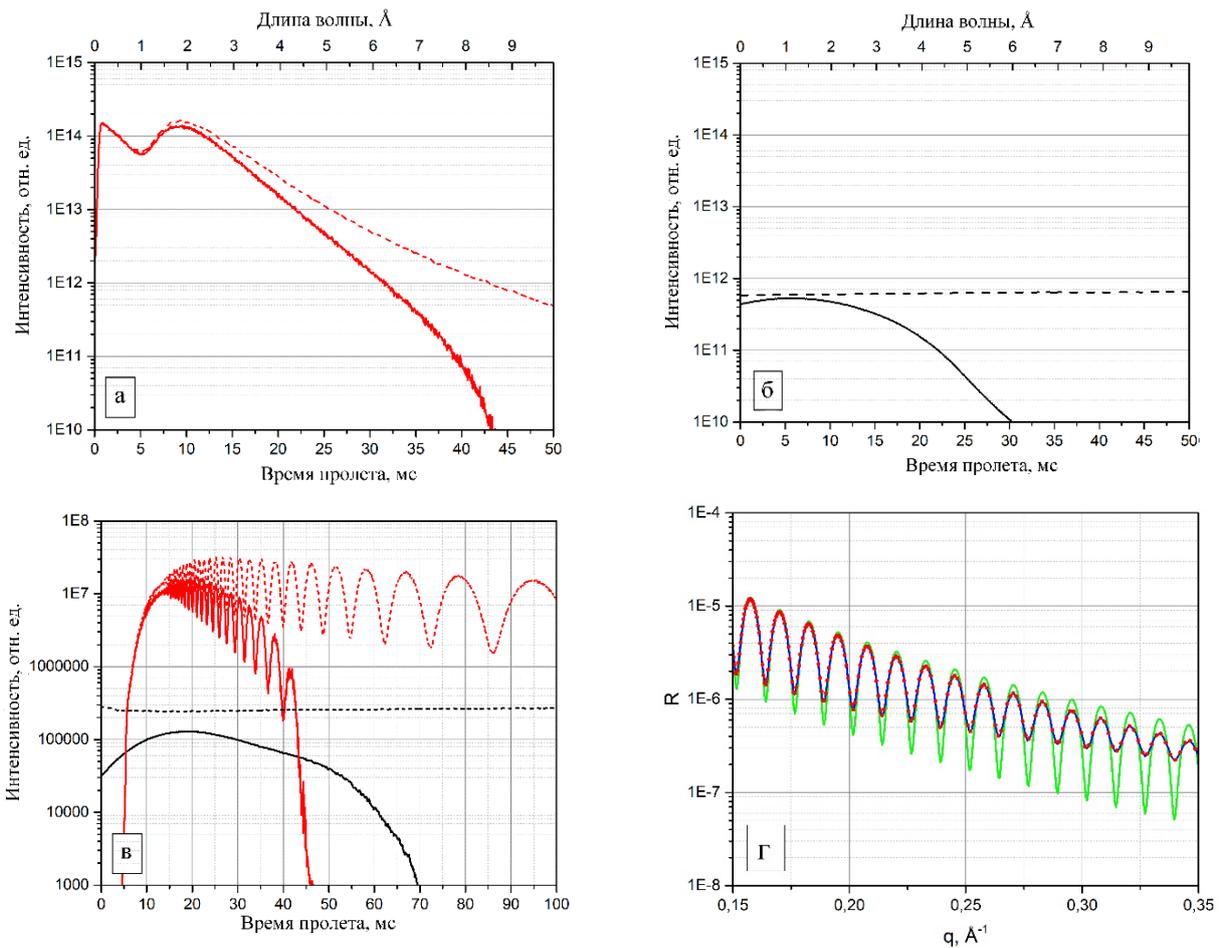


Рис. 11. Регистрируемые времяпролетные спектры для различных случаев. Сплошные линии соответствуют модели в которой используется фоновый прерыватель; пунктирные в его отсутствии. а) Спектр падающего на образец пучка, генерируемого импульсным замедлителем. б) Спектр падающего на образец пучка, генерируемого постоянным замедлителем. в) Спектры отраженных пучков. г) Полученный коэффициент отражения  $R(q)$  для пленки золота толщиной 500 Å на кремниевой подложке. Зеленая сплошная линия – идеальный коэффициент отражения для данного образца; синяя сплошная линия – коэффициент отражения, соответствующий суммарной интенсивности от обоих источников с использованием прерывателя; красные точки – коэффициент отражения, полученный только нейтронами, излученными импульсным замедлителем с использованием фонового прерывателя.

Полученные результаты Монте-Карло моделирования рефлектометрических экспериментов показывают, что установленные на реакторе ИБР-2 стандартные прерыватели фона обеспечивают значительное уменьшение влияния фона на результаты измерений. Однако, в рассматриваемых виртуальных экспериментах подразумевалось, что все нейтроны, которые попадают на образец, участвуют в формировании отраженного пучка. То есть запаздывающие нейтроны также формируют кривую отражения, но с очень низким временным разрешением, определяемым временем открытого состояния прерывателя. В итоге, вклад таких нейтронов оказался настолько мал, что итоговое временное разрешение не может налагать ограничений для измерений коэффициентов отражения вплоть до  $10^{-8}$ .

После исключения фактора фона запаздывающих нейтронов в падающем на образец пучке возникает вопрос о реальном источнике наблюдаемого в экспериментах фона на уровне  $10^{-4}$ . Им может являться только внешний нейтронный фон. Источником такого фона могут быть нейтроны из собственного пучка, рассеянных на различных элементах спектрометра. Также источником фона могут быть нейтроны из соседних установок. В пользу этого утверждения указывают результаты специальных коротких экспериментов, в которых было установлено, что открытие соседних каналов приводит к увеличению скорости набора фоновой подложки. Это прямо указывает на недостаточную защиту канала вывода пучка и детекторной системы от нейтронов, излученных из места расположения соседних установок. Таким образом, для уменьшения влияния внешнего фона и улучшения качества экспериментальных данных стоит улучшить защиту от нейтронного излучения, которое не попадает на исследуемый образец и возникает вне замедлителя, на который направлен спектрометр.

Для улучшения фоновых условий был спроектирован фильтр нейтронного пучка, ограничивающий время видимости поверхности замедлителя нейтронов. На данное устройство был получен патент [A5] и опубликована статья с описанием принципа его работы [A6].

Как отмечалось ранее, фоновые прерыватели, которые используются на установках реактора ИБР-2 имеют время открытия порядка 20 мс. Такое большое время открытия обусловлено необходимостью использования широкого диапазона нейтронов по энергиям и довольно большим расстоянием от замедлителя до места установки прерывателя (более 5 метров). Принцип работы прерывателя легко проиллюстрировать с помощью временной диаграммы, на которой по оси абсцисс откладывается время, а на оси ординат – пролетная база (Рисунок 12). Время пролета отсчитывается от импульса реактора.

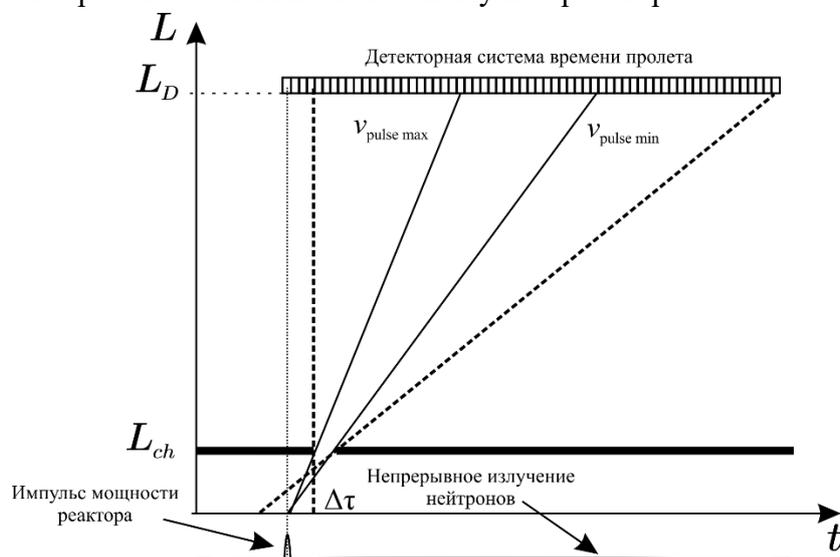


Рис. 12. Диаграмма, демонстрирующая принцип работы дискового (барабанного) фонового прерывателя. На расстоянии  $L_D$  от источника расположен детектор, который накапливает количество нейтронов в узких временных каналах. Фоновый прерыватель установлен на расстоянии  $L_{ch}$ . Сплошные линии указывают на спектральный диапазон нейтронов импульса реактора, которые проходят через окно прерывателя:  $v_{pulse\ min}$  -  $v_{pulse\ max}$ . Пунктирные линии показывают весь спектральный диапазон нейтронов, который пропустит прерыватель.

Окно прерывателя позволяет нейтронам из импульса с диапазоном скоростей от  $v_{pulse\ min}$  до  $v_{pulse\ max}$  и всем нейтронам, излученным во временном окне видимости  $\Delta t$ , пройти, остальные же будут поглощены. Как видно из диаграммы, прерыватель открывает довольно широкое временное окно  $\Delta t$ , в которое пролетают нейтроны вне импульса. Впоследствии эти нейтроны могут рассеиваться на различных узлах установки и попадать в детекторную систему, образуя таким образом некоррелированный с импульсом реактора фон.

Предложенный фильтр (Рисунок 13а) позволяет уменьшить временное окно видимости источника  $\Delta t$ . Достигается это тем, что фильтр имеет форму цилиндра и его окно представляет собой набор узких расходящихся каналов без прямой видимости, каждый из которых может пропустить строго определенный диапазон скоростей нейтронов лишь в требуемом диапазоне времени излучения (Рисунок 13б). Величина этого интервала и его положение на временной оси будет определяться конкретными характеристиками конструкции. Для реактора ИБР-2, очевидно таким интервалом должен быть выбран импульс реактора.

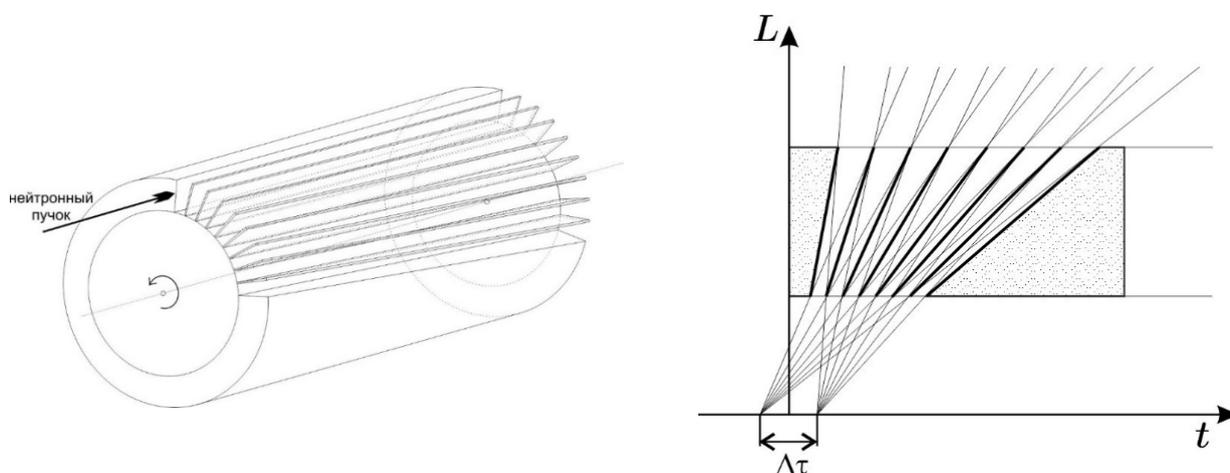


Рис. 13. а) Механический фильтр нейтронного пучка. Конфигурация каналов подобрана таким образом, чтобы нейтроны, излученные в определенный интервал времени, могли проходить через каналы фильтра, остальные же поглощались. б) Диаграмма, демонстрирующая принцип работы фильтра. Никакие нейтроны, кроме тех, что были излучены в интервале времени  $\Delta t$ , не смогут пройти через фильтр.

Конфигурацию каналов можно подобрать таким образом, что отношение  $\Delta v/v$  будет постоянным для всего спектрального интервала. Данный фильтр может быть использован на постоянных источниках нейтронов для организации времяпролетной методики измерений.

**В заключении** представлены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

- Исследован новый метод спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими полями (СЭМУРН-ЛРП) для импульсных источников нейтронов. Показано, что данный метод позволяет получить широкий динамический диапазон измеряемых неоднородностей исследуемых образцов. На данном этапе разработки ожидается, что он составит от 1 нм до 1 мкм.

- В программном пакете VITESS была создана численная модель СЭМУРН-ЛРП спектрометра. Монте-Карло моделирование экспериментов по малоугловому рассеянию в этой модели продемонстрировало работоспособность предлагаемого метода. С помощью данной модели были изучены некоторые особенности метода. Была обнаружена «многорежимность» метода, приводящая к сегментации получаемой зависимости поляризации от длины волны нейтронов. Показано, что секторальная коллимация рассеянного пучка может улучшить чувствительность метода. Отсеивание нейтронов, рассеявшихся в плоскости, перпендикулярной к плоскости вращения спиновых ротаторов приводит к более выраженной зависимости поляризации от угла рассеяния.
- Разработаны и протестированы основные элементы установки СЭМУРН-ЛРП на импульсном реакторе ИБР-2.
- Конфигурация спиновых ротаторов была оптимизирована согласно проведенным расчетам. Были проведены расчеты для создания новых катушек спиновых ротаторов увеличенного размера. Были проведены тепловые расчеты для проектирования системы водяного охлаждения спиновых ротаторов и питающей электроники.
- Изучено влияние фона запаздывающих нейтронов на результаты экспериментов по нейтронному рассеянию. В программном пакете VITESS была создана численная модель рефлектометра, включающая в себя двухкомпонентный источник нейтронов, с параметрами временной структуры, близкими к исследовательскому реактору ИБР-2. Разделение источника на две компоненты позволило наглядно продемонстрировать степень вклада запаздывающих нейтронов в экспериментальные данные. Показано, что влияние запаздывающих нейтронов с использованием прерывателя пучка и учетом того, что эти нейтроны отражаются от образца так же, как и нейтроны из импульса, пренебрежимо мало; возможные ограничения на измерения кривой отражения на установках рефлектометрии могут быть вызваны, прежде всего, нейтронами, рассеянными на элементах спектрометра и фоновыми нейтронами в экспериментальном зале.
- Предложен специальный механический фильтр нейтронного пучка для улучшения фоновых условий на установках нейтронного рассеяния импульсного реактора ИБР-2. Показано, что его использование позволяет ограничить время видимости поверхности замедлителя.

### Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Геометрический фактор в методе спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов с использованием линейно растущих во времени магнитных полей / В. И. Боднарчук [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2016. — № 11. — С. 7—11
- [A2] Expected performance of time-gradient magnetic field SESANS diffractometer at pulsed reactor IBR-2 / V. Bodnarchuk [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Июнь. — Т. 862. — С. 012003
- [A3] Садилов В. В., Боднарчук В. И., Авдеев М. В. Создание прототипа спектрометра спин эхо малоуглового рассеяния нейтронов с линейно растущими магнитными полями на реакторе ИБР-2 // Вестник Международного университета природы, общества и человека Дубна. — 2019. — Т. 4(45). — С. 52—57
- [A4] Боднарчук В. И., Садилов В. В. О влиянии фона запаздывающих нейтронов на экспериментальные возможности установок на импульсных нейтронных источниках с модуляцией реактивности // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2022. — 1 февр. — Т. 19, 2(241). — С. 100—109.
- [A5] Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой: пат. RU2745587C1: G21K 1/04, H05H 3/00 / В. В. Садилов, В. И. Боднарчук (РФ); Заявитель Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). — № 2020125031; заявл. 20.07.2020; опубл. 29.03.2021, Бюл. №10
- [A6] Bodnarchuk V. I., Sadilov V. V. Mechanical neutron beam filter // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — Окт. — Т. 1055. — С. 168547.

### Список литературы

1. Hahn E. L. Spin Echoes // Phys. Rev. 1950. Т. 80, Вып. 4. С. 580-594.
2. Mezei F. Neutron spin echo: A new concept in polarized thermal neutron techniques // Zeitschrift fur Physik A Hadrons and nuclei. 1972. Т. 255, №2. С. 146-160.
3. SESANS with a monochromatic beam or with time-of-flight applied on colloidal systems / W. G. Bouwman [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. С. 529, №1. С. 16-21; Proceedings of the Joint Meeting of the International Conference on Neutron Optics (NOP2004) and the Third International Workshop on Position-Sensitive Neutron Detectors (PSND2004).
4. SESANS studies of colloid phase transitions, dairy products and polymer fibres / W. G. Bouwman [и др.] // Physica B: Condensed Matter. 2004. Т. 350, №1. С. 140-146; Proceedings of the Third European Conference on Neutron Scattering.

5. Spin-echo small-angle neutron scattering study of the structure organization of the chromatin in biological cell / E. G. Iashina [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. C. 862. IOP Publishing. 2017. C. 012010.
6. Investigation of the closed porosity of functional ceramic materials by spin-echo small-angle neutron scattering / K. A. Pavlov [и др.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2017. Т. 11, №1. С. 92-98.
7. Bouwman W. G. Spin-echo small-angle neutron scattering for multiscale structure analysis of food materials // Food Structure. 2021. V. 30. p. 100235.
8. Spin-echo small angle neutron scattering in Delft / M. T. Rekveldt [и др.] // Review of Scientific Instruments. 2005. V. 76, №3. p. 033901.
9. W.H. Kraan [и др.], Zero-field precession induced by adiabatic RF spin flippers // Physica B: Condensed Matter, V. 297, Issues 1–4, 2001, pp. 23-27
10. Bouwman W., Duif C., Gahler R. Spatial modulation of a neutron beam by Larmor precession // Physica B-condensed matter. 2009. V. 404. p. 2585-2589.
11. Using a grating analyser for SEMSANS investigations in the very small angle range / M. Strobl [и др.] // Physica B: Condensed Matter. 2012. V. 407, №21. p. 4132-4135.
12. Feasibility and applications of the spin-echo modulation option for a small angle neutron scattering instrument at the European Spallation Source / A. Kusmin [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2017. V. 856. p. 119-132.
13. Probing magnetic correlations with spin-echo modulated small angle neutron scattering (SEMSANS) / F. Li [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2021. V. 1014. p. 165705.
14. Ioffe A. Spin-echo technique with time-gradient magnetic fields for small-angle neutron scattering and reflectometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2011. V. 634.
15. Virtual Instrumentation Tool for Neutron Scattering at Pulsed and Continuous Sources. 20.11.2021. URL: [https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/em/transport-phenomena/neutronmethods/vitess/index\\_en.html](https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/em/transport-phenomena/neutronmethods/vitess/index_en.html).
16. Neutron instrument simulation and optimization using the software package VITESS / K. Lieutenant [и др.] // Advances in Computational Methods for X-Ray and Neutron Optics. V. 5536. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2004. p. 134-145.
17. Manoshin S., Belushkin A., Ioffe A. VITESS polarized neutron suite: allows for the simulation of performance of any existing polarized neutron scattering instrument // Physica B: Condensed Matter. 2011. V. 406, №12. p. 2337-2341; Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Workshop on Polarised Neutrons for Condensed Matter Investigation.
18. Manoshin S., Ioffe A. New modules for the VITESS software package: Time-gradient magnetic fields and neutron refractive lenses // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2008. V. 586, №1. p. 81-85; Proceedings of the European Workshop on Neutron Optics.
19. A survey of simulations of complex neutronic systems by VITESS / G. Zsigmond [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. V. 529, №1. p. 218-222; Proceedings of the Joint

- Meeting of the International Conference on Neutron Optics (NOP2004) and the Third International Workshop on Position-Sensitive Neutron Detectors (PSND2004).
20. Rekveldt M. T. Novel SANS instrument using Neutron Spin Echo // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 1996. — T. 114, № 3. — С. 366—370.
  21. REFLEX - neutron reflectometer with polarization analysis at IBR-2. URL: <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/reflex>. (дата обр. 21.11.2022).
  22. Shvetsov V. N. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research // Quantum Beam Science. 2017. V. 1. p. 6.
  23. Пуск и исследование основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа: науч. отч. / В.Д. Ананьев [и др.] ОИЯИ 2004. P13-2004-156.
  24. SwissNeutronics AG Neutron Optical Components and Instruments. — URL: <https://www.swissneutronics.ch> (дата обр. 21.11.2022).
  25. Expected performance of time-gradient magnetic field SESANS diffractometer at pulsed reactor IBR-2 / V. Bodnarchuk [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 862. p. 012003.
  26. Bauer G. S. Physics and technology of spallation neutron sources // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2001. V. 463. p. 505.