

К 60-ЛЕТИЮ ОБЪЕДИНЁННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОИЯИ)

Нейтронная физика в ОИЯИ — 60 лет Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка

Е.В. Лычагин, Д.П. Козленко, П.В. Седышев, В.Н. Швецов

26 марта 2016 г. исполнилось 60 лет со времени создания Объединённого института ядерных исследований, в котором была образована Лаборатория нейтронной физики. Уже через четыре года, в 1960 г., был введён в действие первый в мире импульсный быстрый реактор, работающий в периодическом режиме, — ИБР, а в 1984 г. — реактор ИБР-2. Представлены наиболее яркие результаты, полученные в Лаборатории нейтронной физики за последнее десятилетие, современное состояние экспериментальной базы и перспективы развития.

Ключевые слова: импульсный быстрый реактор, нейтронное рассеяние, нейтрон-нейтронное рассеяние, нарушение пространственной чётности в реакциях с нейтронами, ультрахолодные нейтроны

PACS numbers: 28.20. – v, 29.25.Dz, 61.05.F –

DOI: 10.3367/UFNr.0186.201603c.0265

Содержание

1. Введение (265).
 2. Исследование конденсированных сред методами нейтронного рассеяния (266).
 3. Исследования в области нейтронной ядерной физики (269).
 - 3.1. Подготовка эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне на реакторе ЯГУАР (РФЯЦ–ВНИИТФ, г. Снежинск) и первые результаты.
 - 3.2. Измерения Р-нечётной асимметрии продуктов реакций лёгких ядер с холодными поляризованными нейтронами.
 - 3.3. Обнаружение и исследование явления "малого нагрева" ультрахолодных нейтронов.
 4. Заключение (273).
- Список литературы (273).

1. Введение

Лаборатория нейтронной физики (ЛНФ) была образована в 1956 г. в рамках Объединённого института ядерных исследований по инициативе первого директора ОИЯИ Д.И. Блохинцева, её директором был избран И.М. Франк. Сразу же после организации лаборатории начались работы по созданию импульсного реактора на быстрых нейтронах, принцип действия которого был предложен Д.И. Блохинцевым за год до этого на семинаре в ФЭИ (г. Обнинск). В июне 1960 г.

реактор ИБР впервые достиг импульсной критичности [1, 2]. Средняя проектная мощность реактора составляла всего лишь 1 кВт, но уже через два года после начала работы благодаря модернизации системы охлаждения она была повышена до 6 кВт. При работе реактора на мощности 3 кВт и частоте импульсов 5 Гц мгновенная мощность реактора равнялась 15 МВт, а длительность импульса была около 50 мкс [3].

Последовательное развитие первого импульсного реактора привело к существенному сокращению длительности импульса за счёт работы в бустерном режиме с ускорителем электронов в качестве инжектора [4] и увеличению средней мощности за счёт создания новой активной зоны. Эта установка с линейным электронным ускорителем ЛУЭ-40 и активной зоной мощностью 30 кВт получила название ИБР-30 [5]. В настоящее время в Лаборатории нейтронной физики ведётся создание нового источника резонансных нейтронов на базе электронного ускорителя ЛУЭ-200 с неразмножающей нейтронопроизводящей мишенью из естественного урана — ИРЕН [6].

Успешная работа первого реактора ИБР и его модификации ИБР-30 стимулировала начало работ по проектированию импульсного реактора со средней мощностью на уровне нескольких мегаватт. Работы по проектированию и созданию такого реактора были успешно завершены в ОИЯИ к концу 1970-х гг., и в 1978 г. состоялся физический пуск импульсного быстрого реактора со средней мощностью 2 МВт — ИБР-2 [7]. В период с 1984 г. до конца 2006 г. реактор успешно работал в режиме пользовательской установки, и время на выведенных пучках предоставлялось для исследователей из стран-участниц Объединённого института ядерных исследований. История развития импульсных источников нейтронов в ЛНФ ОИЯИ до этого периода подробно изложена в обзоре В.Л. Аксёнова [8].

25 декабря 2006 г. реактор был остановлен для глубокой модернизации. За четыре года были проведены

Е.В. Лычагин, Д.П. Козленко, П.В. Седышев, В.Н. Швецов.
Объединённый институт ядерных исследований,
Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка,
ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл.,
Российская Федерация
Тел. (49621) 65-925. Факс (49621) 65-429. E-mail: shv@nf.jinr.ru

Статья поступила 6 июля 2015 г.,
после доработки 23 ноября 2015 г.

работы по замене основных компонентов реактора: корпуса, натриевых трубопроводов, системы контроля и управления реактором и др. 17 декабря 2010 г. первые четыре топливные кассеты были установлены в новый корпус реактора и начался этап физического пуска. К середине 2011 г. был пройден этап энергетического пуска реактора и начиная с 2012 г. возобновилась программа приёма пользователей на установках ИБР-2 [9].

Важной особенностью обновлённого реактора ИБР-2 является наличие комплекса криогенных замедлителей нейтронов. В настоящее время реализована первая очередь этого комплекса (КЗ-202), которая обеспечивает модификацию спектра нейтронов с увеличением выхода холодных нейтронов на пучках №№ 7, 8, 10 и 11 (рис. 1, 2) [10]. До 2018 г. планируется изготовление и ввод в эксплуатацию ещё двух криогенных замедлителей для пучков №№ 4, 5, 6, 9 и №№ 2, 3. Уже работающий криогенный замедлитель КЗ-202 и создаваемые КЗ-201 и КЗ-203 являются уникальными устройствами. Впервые в мире камера замедлителя заполнена не криогенной жидкостью или льдом рабочего вещества, а шариками диаметром 3–5 мм. В качестве рабочего вещества была выбрана смесь мезитилена и м-ксилола, которая имеет

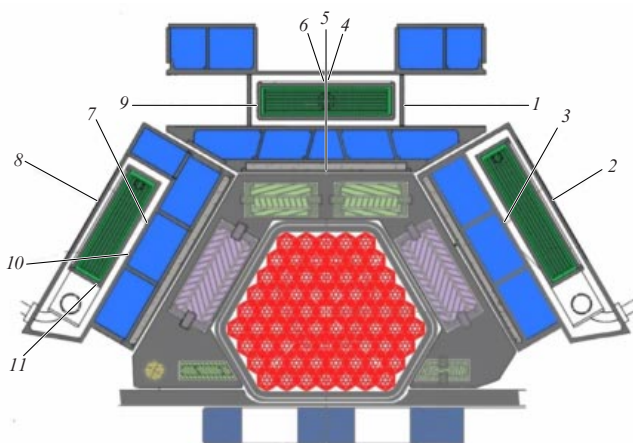


Рис. 1. Комплекс криогенных замедлителей на реакторе ИБР-2. Цифрами указаны номера экспериментальных каналов, обслуживаемых разными замедлителями.

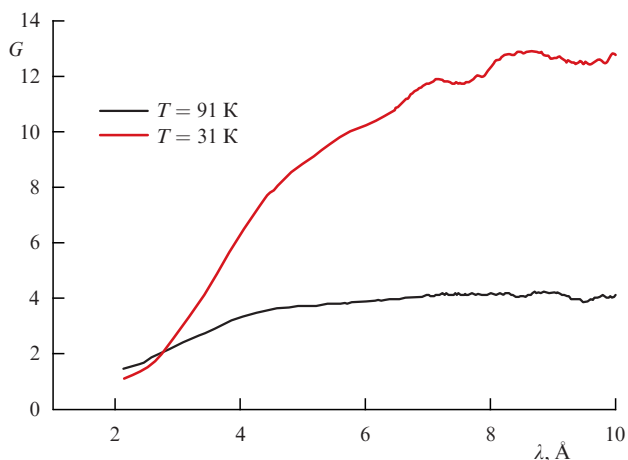


Рис. 2. Фактор выигрыша (отношение плотности потока нейтронов от криогенного замедлителя при данной температуре к плотности потока от водяного замедлителя при температуре 300 К), экспериментально измеренный при работе КЗ-202.

аморфную структуру и даёт большой выход холодных нейтронов по сравнению с чистым мезитиленом вследствие обогащения плотности низколежащих энергетических уровней молекул. Этот выбор был обусловлен исследованиями неупругого рассеяния медленных нейтронов на ароматических углеводородах при низких температурах [11] и радиационной стойкости различных водородосодержащих материалов [12], которые были проведены физиками ЛНФ на реакторе ИБР-2 в период времени, предшествующий его модернизации. В результате был создан криогенный замедлитель, сохраняющий положительные качества жидководородного, при этом являясь существенно более безопасным и дешёвым при изготовлении и эксплуатации.

С момента создания первого импульсного реактора в Дубне в ЛНФ начались работы по нейтронной спектроскопии ядер. Уже к середине 1960-х гг. были созданы уникальные экспериментальные установки, включая спектрометр поляризованных нейтронов и ядер ПОЛЯНА [13], на котором было обнаружено явление несохранения пространственной чётности в резонансе ^{139}La с энергией 0,75 эВ [14]. Тогда же, в середине 1960-х гг., начинаются исследования неупругого рассеяния и дифракции нейтронов конденсированными средами на импульсном источнике нейтронов [3]. Все эти исследования проводились под научным руководством Ф.Л. Шапиро, приглашённого И.М. Франком на должность заместителя директора Лаборатории нейтронной физики в 1958 г. По свидетельствам очевидцев, tandem, образованный этими выдающимися физиками — И.М. Франком и Ф.Л. Шапиро, был залогом успеха, достигнутого лабораторией [15, 16].

В 1968 г. по предложению Ф.Л. Шапиро был реализован эксперимент по поиску ультрахолодных нейтронов (УХН) [17]. В настоящее время в ЛНФ существуют несколько групп исследователей, работающих с ультрахолодными нейтронами. Это направление продолжает приносить уникальные результаты в областях исследования процессов квантования энергии нейтрона при взаимодействии с движущимися дифракционными решётками и ускоренным веществом [18–20], проверки слабого принципа эквивалентности для нейтрона [21], измерения времени жизни нейтрона [22] и его квантовых состояний в гравитационном поле Земли [23], эффектов "малого нагрева" ультрахолодных нейтронов при взаимодействии с поверхностью вещества (раздел 3.3 данной статьи).

В настоящее время все эти направления успешно развиваются в Лаборатории нейтронной физики. Наиболее яркие результаты исследований в период до 2000 г. представлены в обзорах [24–27].

2. Исследование конденсированных сред методами нейтронного рассеяния

Реактор ИБР-2, являясь одним из пяти наиболее "ярких" источников в мире, оснащён также и уникальным комплексом нейтронных спектрометров, позволяющим проводить широкий круг междисциплинарных исследований в области физики конденсированного состояния, материаловедения, химии, биологии, геофизики, фармакологии, медицины, ядерной физики, экологии и др. [28]. Период остановки реактора в 2007–2010 гг. был эффективно использован для модернизации существующих и создания новых установок, количество действующих спектрометров для исследования конденсированных сред за последние пять лет было увеличено с 11 до 14. Среди новых установок — высокоинтенсивный дифрактометр для исследования микрообразцов ДН-6, много-

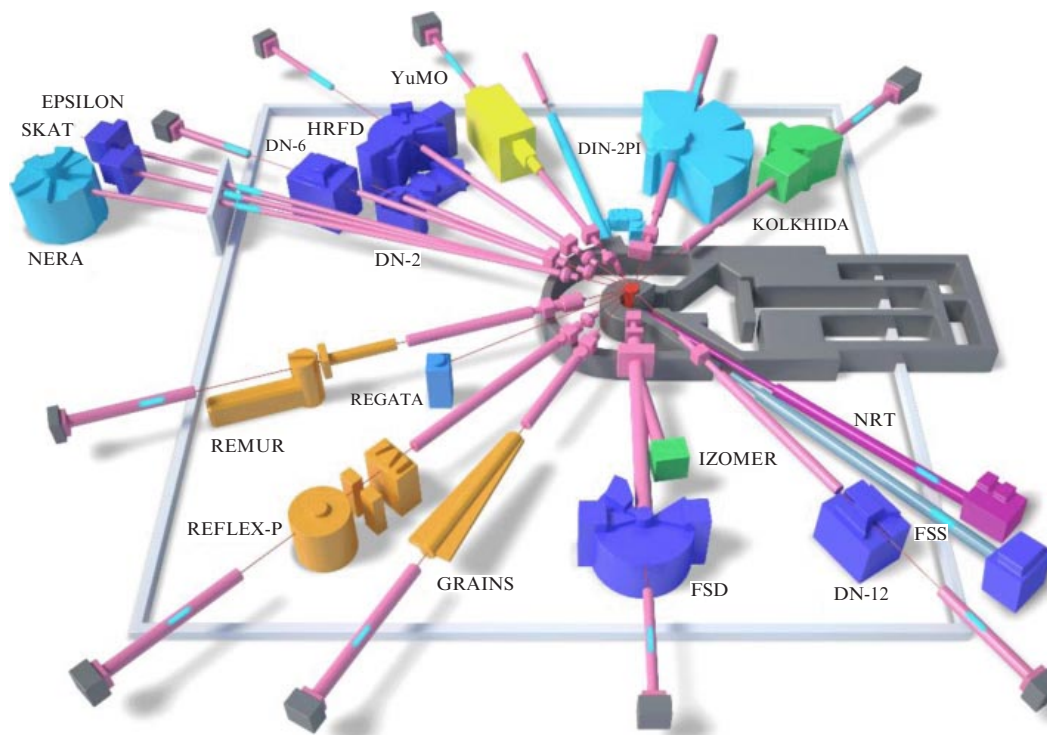


Рис. 3. Схема расположения установок в экспериментальном зале реактора ИБР-2.

функциональный рефлектометр ГРЭИНС, спектрометр нейтронной радиографии и томографии. Схема расположения установок в экспериментальном зале ИБР-2 представлена на рис. 3.

Спектрометры, используемые для исследований конденсированных сред, в настоящее время включают в себя семь дифрактометров, три рефлектометра, один спектрометр малоуглового рассеяния, два спектрометра неупругого рассеяния нейтронов, один спектрометр для нейтронной радиографии и томографии. Преобладание дифрактометров в некоторой степени обусловлено историческими причинами, а также рядом объективных факторов — развитием новой уникальной методики фурье-дифрактометрии, позволяющей проводить дифракционные эксперименты на кристаллических материалах с очень высоким разрешением по межплоскостному расстоянию (вплоть до $\Delta d/d \approx 0,1-0,2\%$), и широкими возможностями применения дифракционных методик в междисциплинарных научных исследованиях, от физики конденсированного состояния до биофизики, геофизики и медицины.

На комплексе спектрометров реактора ИБР-2 реализуется программа пользователей. Сбор заявок на проведение экспериментов осуществляется дважды в год, распределение пучкового времени происходит на основе оценок поданных заявок международными комитетами, состоящими из высококвалифицированных экспертов. Так, в 2013 г. было получено 200 заявок на проведение экспериментов на спектрометрах ИБР-2 из 15 стран, при этом большинство заявок поступило от внешних организаций.

Нейтронные методы исследования конденсированных сред имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами, в частности, основанными на использовании рентгеновского и синхротронного излучения [29]. Нейтроны взаимодействуют с ядрами, а не с электронными оболочками. Длина рассеяния нейтрона может сильно различаться для изотопов одного элемента. Это

позволяет реализовать метод изотопного контраста и даёт возможность определения положений лёгких атомов на фоне тяжёлых при анализе структуры материала со значительно большей точностью по сравнению с методами рассеяния рентгеновского и синхротронного излучения. Особенно ярко возможности нейтронной радиографии проявляются в системах, содержащих водород, таких как полимеры, биологические системы, органические и водные растворы. Кроме того, нейтрон имеет собственный магнитный момент и интенсивность магнитного рассеяния сопоставима с интенсивностью ядерного рассеяния. Поэтому методы рассеяния нейтронов являются наиболее прямым и информативным способом определения магнитной структуры материалов, включая объёмные формы, тонкие плёнки и слоистые наноструктуры. Из-за слабого взаимодействия с веществом нейтронные исследования можно проводить даже с деликатными биологическими системами без их разрушения в процессе эксперимента. Благодаря высокой проникающей способности нейтрона методы рассеяния нейтронов позволяют получать объёмные характеристики исследуемых материалов даже в условиях использования сложных устройств окружения образца, таких как сложные криостаты, печи, камеры высокого давления, электромагниты.

Эти особенности методов рассеяния нейтронов определяют круг задач, для решения которых они наиболее эффективны. Методы рассеяния нейтронов имеют неоспоримые преимущества при изучении свойств наносистем и материалов, содержащих водород и другие лёгкие атомы (Li, O, ...), изотопических наноматериалов, магнитных наносистем, биологических и полимерных объектов на наномасштабе. Следует отметить, что именно функциональные материалы с лёгкими атомами и магнитными атомами в настоящее время широко используются и внедряются для последующего применения в технологиях в областях электроники, записи и хранения информации, водородной энергетики. Это обусловли-

вает возрастающие потребности и интерес научного сообщества к исследованиям с применением методов рассеяния нейтронов.

С учётом изложенного выше актуальными направлениями фундаментальных и прикладных исследований конденсированных сред на реакторе ИБР-2 являются следующие:

- физика и химия новых функциональных материалов;
- физика наносистем и наноразмерных явлений;
- физика и химия комплексных жидкостей и полимеров;
- молекулярная биология и фармакология;
- материаловедение и инженерные науки.

Рассмотрим более подробно результаты некоторых из проведённых исследований. Одной из актуальных научных задач современного материаловедения является создание новых функциональных материалов, позволяющих улучшить характеристики и эксплуатационные свойства литий-ионных перезаряжаемых аккумуляторов. Они являются источником электрической энергии для надёжной работы самых разнообразных устройств, от мобильного телефона до авиалайнера. Для этой цели важным является получение информации об изменениях микро- и кристаллической структуры, в том числе в процессе работы аккумулятора. Исследование структурного поведения новых электродных материалов на основе модифицированного LiFePO_4 непосредственно при заряде и разряде аккумулятора, а также в стационарных условиях было проведено на реакторе ИБР-2 методом нейтронной дифракции [29]. В результате экспериментов детально изучены фазовые переходы, происходящие в электродах непосредственно в ходе циклов заряда–разряда, и идентифицированы структурные причины улучшения их характеристик. Установлено, что модификация LiFePO_4 с помощью добавки ванадия способствует улучшению проводимости за счёт уменьшения размера кристаллитов, а не за счёт замещения ванадием других ионов в кристаллической структуре исходного катодного материала, как предполагалось ранее.

Другим интересным направлением исследований является изучение структурных и магнитных свойств материалов в условиях экстремальных воздействий (внешнего высокого давления). Воздействие высокого давления на вещество вызывает уменьшение межатомных расстояний и изменение потенциальной энергии

межатомных взаимодействий, что приводит к образованию новых форм вещества, свойства которых могут быть весьма необычными. В магнитных материалах при сжатии, как правило, стабильность магнитного упорядочения возрастает за счёт усиления обменных взаимодействий, что сформулировано в одной из классических работ Д. Блоха [31]. В ходе нейтронных исследований сложного оксида — мультиферроика YMnO_3 с классическим спином $S = 2$ и геометрически фрустрированной квазидвумерной треугольной решёткой (рис. 4) — недавно было продемонстрировано, что возможен и обратный эффект: разрушение дальнего магнитного порядка и формирование динамически разупорядоченного состояния, аналогичного состоянию спиновой жидкости, которое, как раньше считалось, может реализоваться только для квантовых магнетиков со спином $S = 1/2$ [32, 33]. Была установлена прямая взаимосвязь между степенью искажения треугольной решётки и выраженностью спиновых флуктуаций.

Важной составляющей большинства типов клеток животных и растений являются митохондрии, основная задача этих органелл — выработка энергии для клеточных процессов. В отличие от синхротронного излучения, вызывающего сильные радиационные повреждения живых клеток, использование нейтронного излучения позволяет проводить эксперименты на живых биологических объектах без потери их функциональности. С помощью малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ИБР-2 впервые проведены исследования "живых" функционирующих митохондрий, помещённых в специфические инкубационные среды и условия [34, 35]. Выявлены особенности в структуре внутренней митохондриальной мембраны при снижении осмотичности среды инкубации. Показано, что в определённых условиях митохондриальная мембрана формирует специфические упорядоченные структуры (рис. 5). В частности, происходит изменение упаковки мембраны с ламеллярной (плоской) на гексагональную. Применение рассеяния нейтронов также позволило получить картины рассеяния отдельно для липидной и белковой компонент митохондрий при исследовании структуры целостных митохондрий, а также информацию о распределении белка и липида во внутренней митохондриальной мембране.

Высокая проникающая способность позволяет эффективно использовать методы рассеяния нейтронов для неразрушающего контроля внутренних напряжений

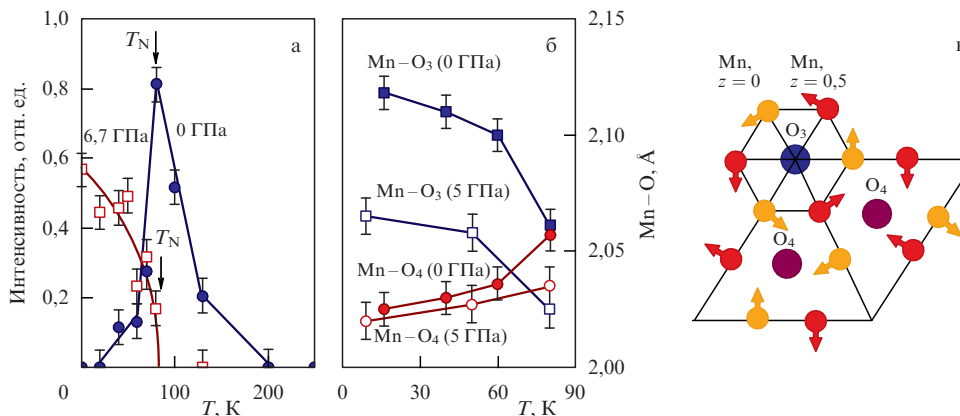


Рис. 4. (а) Температурная эволюция магнитного диффузного рассеяния в YMnO_3 при давлениях 0 и 6,7 ГПа, демонстрирующая подавление исходного дальнего антиферромагнитного порядка и появление нового магнитного состояния с ближним магнитным порядком и сильными спиновыми флуктуациями. (б) Температурные зависимости межатомных связей Mn–O, определяющих баланс конкурирующих сверхобменных магнитных взаимодействий на треугольной решётке. (в) Схематическое представление гексагональной структуры YMnO_3 с квазидвумерной треугольной магнитной решёткой ионов Mn. (По данным работ [32, 33].)

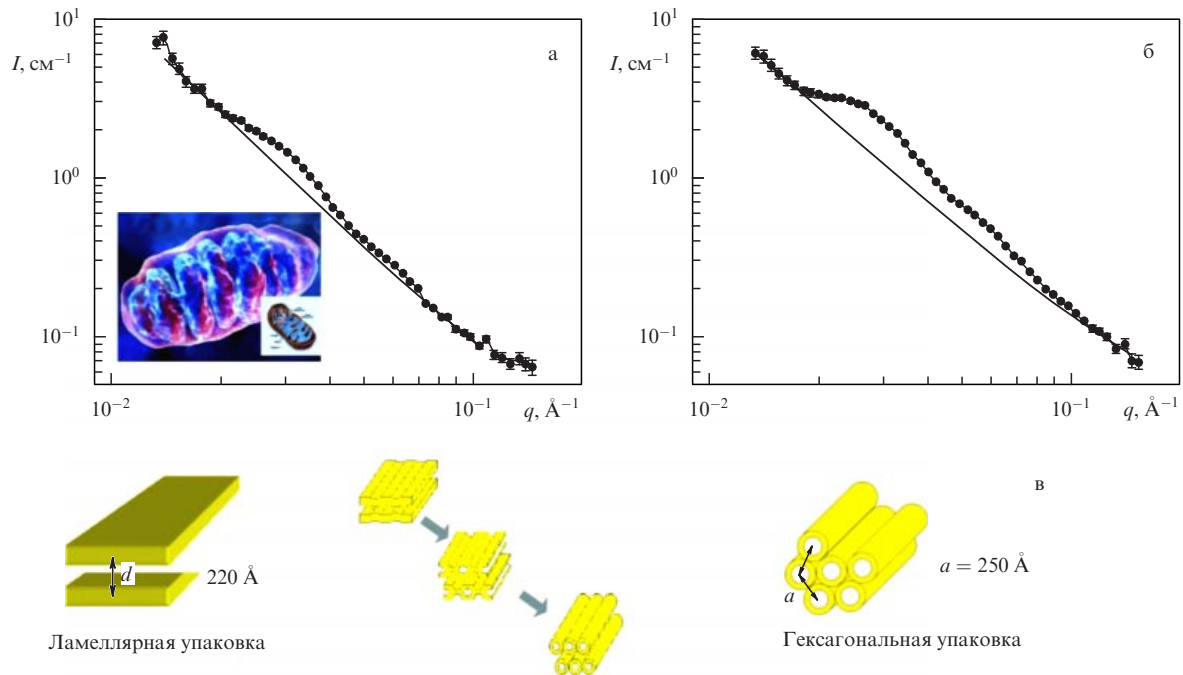


Рис. 5. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов от митохондрий сердца крысы в изотонической (250 мОсм) (а) и гипотонической (90 мОсм) (б) средах. На вставке показано схематическое изображение митохондрии. (в) Иллюстрация структурной перестройки в митохондриальной мембране с ламеллярной упаковки на гексагональную в гипотонических условиях. (По данным работы [34].)

в объёмных материалах и изделиях. Важной проблемой современной ядерной энергетики является контроль состояния металла корпуса реактора в течение всего срока его службы для обеспечения его целостности при нормальных условиях эксплуатации, а также с учётом вероятности возможных неисправностей. Важным источником информации о деградации механических свойств корпусных сталей в условиях воздействия нейтронного облучения являются образцы-свидетели, которые располагаются у внутренней стенки шахты реактора. Для увеличения количества облучаемых образцов корпусной стали реактора в процессе его эксплуатации используется технология реконструкции образцов-свидетелей после их механических испытаний с помощью различных видов сварки (электродуговой, электронно-лучевой, лазерной и т.д.). Для разделения эффектов влияния нейтронного излучения и процедуры восстановления образцов на механические свойства необходимо учитывать уровень остаточных напряжений, возникающих при сварке в реконструированных образцах-свидетелях. На реакторе ИБР-2 изучено распределение остаточных напряжений в образцах-свидетелях, которые возникают после электронно-лучевой (electron beam welding, EBW) и лазерной (laser beam welding, LBW) сварки [36]. Результаты экспериментов (рис. 6) показали, что уровень остаточных напряжений для образца LBW значительно выше, чем для образца EBW, и достигает величины 550 МПа в районе сварного шва. По уширению дифракционных пиков также был рассчитан уровень остаточных микродеформаций, который характеризует плотность дислокаций в исследуемом материале. В образце EBW микродеформации достигают $3,5 \times 10^{-3}$, а для образца LBW они несколько выше — $4,5 \times 10^{-3}$. Данный эффект сопровождается значительным увеличением микротвёрдости в зоне сварных швов примерно в 2,5 раза, что может быть обусловлено формированием мартенситной (или мартенситно-бейнитной) структуры в области сварного шва и зоны термического влияния.

Среди других важных результатов последних лет можно отметить исследования эффекта регулирования размеров наночастиц в магнитных жидкостях [37], явления сосуществования сверхпроводимости и магнетизма в слоистых магнитных наноструктурах [38], структурной организации липидных наносистем, моделирующих верхний слой человека и млекопитающих [39], формирования оптических свойств новых наноструктурированных материалов — люминофоров [40], структурных и магнитных свойств интерметаллидов RCO_2 в условиях изменения термодинамических параметров (температуры, давления) [41, 42], взаимосвязи текстуры горных пород, фазовых превращений в геоматериалах и сейсмотектонических эффектов [43].

3. Исследования в области нейтронной ядерной физики

3.1. Подготовка эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне на реакторе ЯГУАР (РФЯЦ – ВНИИТФ, г. Снежинск) и первые результаты

Для экспериментального решения вопроса о степени нарушения зарядовой симметрии ядерных сил чрезвычайно интересным представляется измерение рассеяния свободных нейтронов друг на друге. Поскольку в природе не существует чисто нейтронной мишени, такой эксперимент возможен только на интенсивных нейтронных источниках. В.Ф. Колесов в монографии [44] отмечает, что впервые преимущества импульсного реактора для реализации такого эксперимента были оценены в далёком 1969 г. [45]. Задача измерения сечения рассеяния нейтрона на нейтроне являлась одной из приоритетных задач в научной программе при создании реактора ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ. В 1990-е гг. сотрудники ЛНФ рассматривали возможность реализации эксперимента на реакторе БИГР (ВНИИЭФ, Саров) [46, 47]. За пределами СССР и

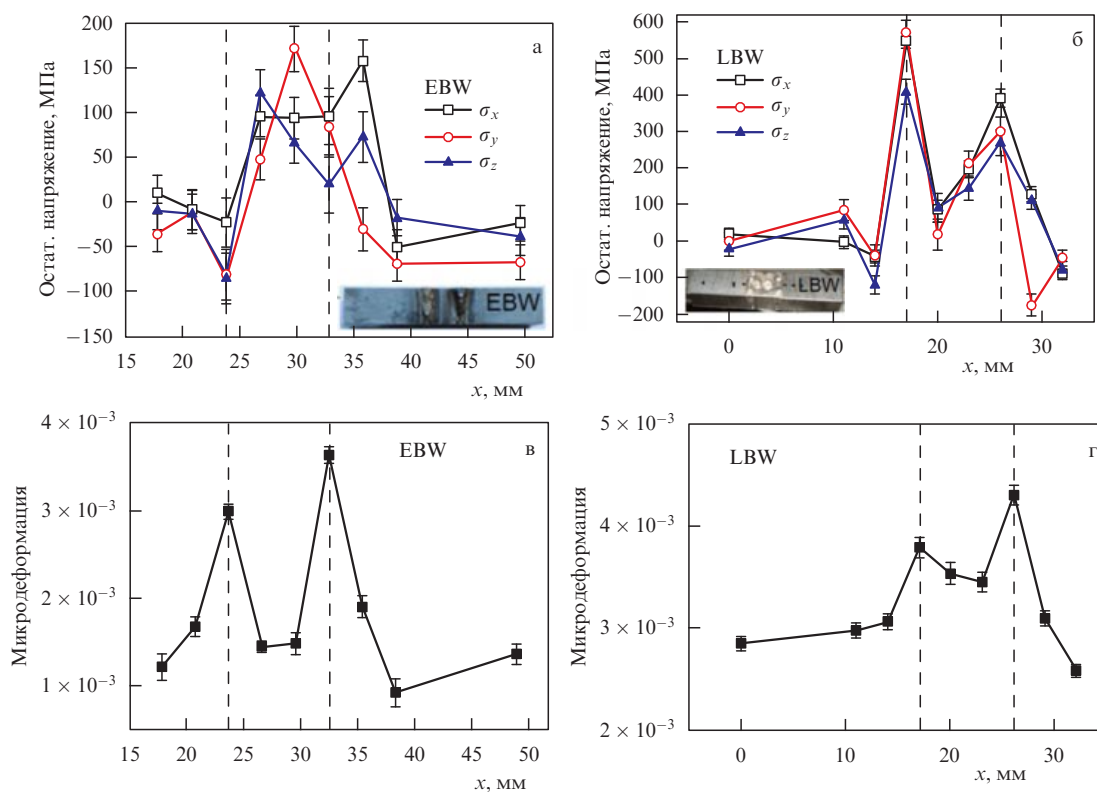


Рис. 6. Распределения остаточных напряжений (а, б) и микродеформаций (в, г) в образцах, восстановленных методами электронно-лучевой (EBW) и лазерной (LBW) сварки, полученные при сканировании нейтронным пучком вдоль координаты x образца. На вставках рис. а, б показаны фотографии исследуемых образцов.

России в разное время существовало достаточно много других проектов, но ни один из них не доходил до стадии реализации.

Первые обсуждения возможности постановки эксперимента на реакторе аperiodического действия ЯГУАР [48] проходили в начале 2000 г. на Харитоновских тематических чтениях во ВНИИЭФ по инициативе В.Ф. Колесова. Идея, первые расчёты и результаты измерения нейтронных полей в сквозном канале реактора были представлены на нескольких совещаниях и в публикациях [49–51]. В результате в 2003 г. была организована коллаборация DIANNA, в которую вошли учёные ЛНФ ОИЯИ, РФЯЦ–ВНИИТФ, TUNL (США), Gettysburg College (США). Коллаборация при финансовой поддержке МНТЦ приступила к реализации проекта создания экспериментальной установки, который был закончен в 2008 г.

За это время был проделан большой объём работ: проведены расчёты нейтронных полей, расчёты фоновых условий при специальной защите, экспериментальная проверка модельных расчётов защиты; разработана схема экспериментальной установки, проведены расчёты по оптимизации коллимационной системы; проведена модернизация реакторного зала (под реактором создана шахта глубиной 10 м, в перекрытии реакторного зала смонтировано отверстие для нейтронного канала); создана экспериментальная установка, включающая в себя 28-метровый вакуумный канал, уникальную систему коллимации нейтронного пучка и уникальный детектор нейтронов с системой сбора данных. Описание и результаты этих работ можно найти в публикациях [52–61].

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 7.

Тепловые нейтроны во время импульса реактора длительностью около 1 мс сталкиваются в вакуумном канале, проходящем сквозь замедлитель в активной зоне.

Вдоль оси канала, на которой расположен детектор, могут лететь только нейтроны, рассеявшиеся друг на друге (или на остаточном газе в канале, который откачан до глубокого вакуума). Благодаря коллимационной системе детектор "не видит" стенок канала. Для отделения полезного сигнала от фона используются специальная система коллимации, метод времени пролёта, измерение зависимости наблюдаемого сигнала от интенсивности нейтронного импульса, которая должна быть пропорциональна квадрату нейтронной плотности.

Были успешно проведены тестовые и калибровочные измерения. При первых попытках измерения сечения np -рассеяния был обнаружен нейтронный фон, квадратично зависящий от энергии импульса реактора и превышающий ожидаемый эффект примерно в 30 раз [54]. Эта зависимость и спектр регистрируемых нейтронов указывают на то, что источником фона является водород, попадающий в вакуумный канал вследствие радиационной десорбции со стенок [61].

Работы были приостановлены из-за модернизации реактора, которая проходила в 2009–2014 гг. Для дальнейшего продвижения в данном направлении принципиально необходимо подавление наблюдаемого фона не менее чем в 100 раз. На сегодняшний день можно сказать, что первая попытка реализации эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне столкнулась с трудностями, преодоление которых требует значительных ресурсов.

3.2. Измерения P -нечётной асимметрии продуктов реакций лёгких ядер с холодными поляризованными нейтронами

С 2002 по 2009 гг. был проведён цикл экспериментов по измерению коэффициентов пространственно-нечётной

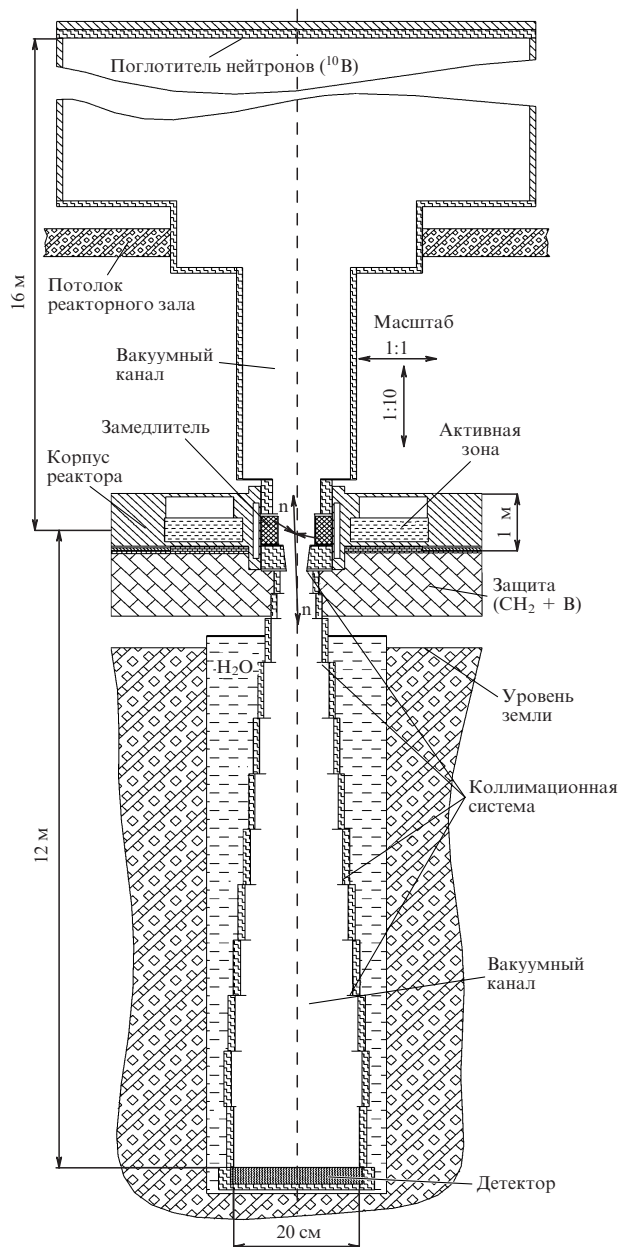


Рис. 7. Схема экспериментальной установки.

(Р-нечётной) асимметрии в угловых распределениях продуктов реакций на лёгких ядрах ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ и ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}(\text{о.с.})$ с холодными поляризованными нейтронами. Основные фундаментальные задачи, на решение которых были направлены работы, — поиск нейтральных токов в слабых нуклон-нуклонных (N–N) взаимодействиях при низких энергиях (в безлептонных процессах с сохранением ароматов кварков) и проверка справедливости описания слабых N–N-взаимодействий в модели потенциала однобозонного (однобозонного) обмена (one-boson-exchange potential, OBER) [62]. Конкретной задачей является определение слабой π -мезонной константы связи f_π (\hbar^1_π) нарушающего чётность N–N-потенциала.

В модели OBER нарушающее чётность взаимодействие осуществляется посредством обмена легчайшими мезонами между нуклонами: π^\pm , ρ , ω (так же как и при сохраняющем чётность ядерном взаимодействии) [63]. В отличие от ядерного взаимодействия, в этом случае мезоны появляются в результате слабого взаимодействия между кварками внутри одного из нуклонов.

Нарушающий чётность потенциал параметризован набором из шести безразмерных слабых констант $h_{M}^{\Delta T}$. Р-нечётные эффекты в N–N-взаимодействиях и ядрах связаны с физикой слабых взаимодействий между кварками посредством слабых констант. Эти константы могут быть вычислены из основных положений Стандартной модели, кварковой структуры нуклонов и т.д. [63–66]. Однако из-за сложностей, связанных с учётом влияния сильного взаимодействия, диапазон предсказаний констант достаточно широк. π -мезонная константа связи важна тем, что обмен π^\pm -мезонами обусловлен взаимодействием нейтральных токов.

Поиском нейтральных токов в ядерных реакциях и экспериментальным определением слабых констант связи научное сообщество занимается уже более 40 лет, однако до сих пор большого успеха достигнуто не было. Проблемы, препятствующие прогрессу в этой области, как теоретические, так и экспериментальные, связаны с тем, что для сложных ядер (где есть усиление Р-нечётных эффектов) практически невозможно провести расчёты Р-нечётных эффектов из-за неопределённости волновых ядерных функций, а для "голых" нуклонов и малонуклонных систем эффекты малы ($\sim 10^{-7}$), и эксперименты трудноосуществимы. К настоящему времени только в нескольких экспериментах удалось достигнуть точности, позволяющей провести оценки слабых констант (см. [63, 67]). При этом в экспериментах по рассеянию поляризованных протонов на протонной мишени, где Р-нечётный эффект определяется заряженными токами, величины соответствующих констант хорошо согласуются с так называемыми "лучшими значениями" Б. Дипланка и др. [63], что подтверждает правильность модели однобозонного обмена и доказывает наличие заряженных слабых токов в нуклон-нуклонных взаимодействиях. С другой стороны, в измерениях циркулярной поляризации γ -квантов ${}^{18}\text{F}$, где взаимодействие определяется исключительно нейтральным током, эффект не был обнаружен. Получено строгое ограничение на пионную константу связи $f_\pi \leq 1,1 \times 10^{-7}$, но это значение почти в 4 раза меньше "лучшего значения". Оценки, полученные из других экспериментов, где эффекты определяются комбинацией констант, дают разброс f_π от 0 до $\sim 9 \times 10^{-7}$. Наиболее подходящий кандидат для решения проблемы, связанной со значением f_π , — измерение асимметрии γ -квантов в реакции $pn \rightarrow d\gamma$ с поляризованными нейтронами. Однако малое сечение реакции и малая ожидаемая величина эффекта ($\leq 2 \times 10^{-8}$) делает эти измерения весьма непростыми.

В ЛНФ ОИЯИ и ПИЯФ были предложены эксперименты на легчайших ядрах, где измерения асимметрий представляются более реалистичными. Р-нечётные эффекты в исследуемых реакциях были рассчитаны в рамках кластерного подхода [68, 69]. Ожидаемые значения корреляций лежат на уровне $10^{-8} - 10^{-7}$. Одно из достоинств этих реакций — большое сечение взаимодействия, что делает вклад от фоновых реакций относительно малым.

Эксперименты по измерению Р-нечётной асимметрии вида $\alpha_{\text{PNC}}^i(s_n, p_i)$ в реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ и $\alpha_{\text{PNC}}^i(s_n, p_i)$ в реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}(\text{о.с.})$ были проведены на холодных ($\langle \lambda_n \rangle = 4,7 \text{ \AA}$) поляризованных (94%) нейтронах пучка PF1В реактора ИЛЛ (Гренобль), обеспечивающего интегральную интенсивность $(4-5) \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$. В экспериментах применялась так называемая интегральная методика измерений малых эффектов. Методика позволяет использовать высокие интенсивности нейтронов и исключить возможные ложные аппаратные эффекты. Основу методики составляют токовый метод регистрации событий, применение двухдетекторной си-

стемы, техника компенсации флуктуаций мощности реактора, периодическое переключение направления, ведущего нейтронный спин магнитного поля, и проведение нулевого эксперимента. В качестве детектора тритонов использовалась 48-секционная ионизационная камера с 24 мишенями ${}^6\text{LiF}$, поглощавшими более 60 % интенсивности. Для нулевых экспериментов литиевые мишени дополнительно покрывались алюминиевой фольгой, полностью поглощающей тритоны, и проводились измерения в тех же условиях, что и при основных экспериментах [70, 71]. В измерениях с ${}^{10}\text{B}$ применялась система двух детекторов NaI(Tl) и образец, полностью поглощавший нейтроны. В работах [72, 73] представлены эксперименты, выполненные в 2001, 2002, 2007 гг. Для уменьшения влияния флуктуаций мощности реактора методика интегральных измерений была существенно модернизирована, что позволило работать на частоте переключения спина нейтрона выше основных частот флуктуаций мощности реактора [74]. Окончательный результат приведён в работе [75].

В результате экспериментов были получены асимметрия в реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ $\alpha_{\text{PNC}}^i = -(8,6 \pm 2,0) \times 10^{-8}$ и оценка пионной константы связи $f_\pi \leq 1,1 \times 10^{-7}$ на уровне достоверности 90 %. Асимметрия γ -квантов в реакции с ${}^{10}\text{B}$ $\alpha_{\text{PNC}}^i = (0,7 \pm 2,3) \times 10^{-8}$, откуда следует $f_\pi \leq 0,7 \times 10^{-7}$ на уровне достоверности 90 %. В обоих случаях константа меньше "лучшего значения" [63] в подходе Дипланка, Донахью, Хольстена ($f_\pi = 4,6 \times 10^{-7}$).

Несогласуемость экспериментальных данных с теоретическим рассмотрением в рамках модели ОВЕР заставляет всё больше авторов полагать, что механизм слабого N–N-взаимодействия более сложен, и предлагать новые теоретические подходы [76]. С точки зрения нейтронных экспериментов перспективными остаются исследования малонуклонных систем и легчайших ядер.

3.3. Обнаружение и исследование явления "малого нагрева" ультрахолодных нейтронов

Обнаружение явления "малого нагрева" УХН связано в первую очередь с поисками причин так называемых аномальных потерь УХН из вещественных ловушек. Использование УХН в физических экспериментах привлекательно благодаря возможности их длительного удержания в замкнутом объёме — ловушке. Так, наиболее точное на сегодняшний день значение времени жизни свободного нейтрона [77] и наиболее сильное ограничение на существование электрического дипольного момента нейтрона [78] получены в экспериментах с УХН. В различных научных центрах ведутся работы по улучшению существующих или созданию новых интенсивных источников УХН для развития подобных экспериментов и повышения точности результатов.

С момента открытия УХН до сегодняшнего дня во всех экспериментах по хранению УХН их потери из ловушек значительно превышали теоретически ожидаемые значения. Для ловушек, изготовленных из таких слабопоглощающих материалов, как бериллий и твёрдый кислород, такое превышение составляет два-три порядка.

Корректный учёт потерь нейтронов из ловушки и учёт возможных изменений спектра УХН в процессе хранения нейтронов во многом определяет систематическую точность экспериментов с УХН, таких как измерение времени жизни нейтрона, где данные потери — конкурирующий с β -распадом нейтрона процесс исчезновения из ловушки нейтронов, а изменение спектра во время хранения приводит к необходимости вводить соответствующие систематические поправки результатов.

Помимо β -распада нейтрона, традиционное представление о взаимодействии УХН с веществом допускает их исчезновение из герметичной вещественной ловушки только по двум каналам: захват ядрами вещества стенок ловушки и нагрев на стенках ловушки (неупругое рассеяние). Последнее предполагает наиболее вероятное рассеяние УХН в область энергий, соответствующих температуре стенок ловушки и превышающих их кинетическую энергию на пять порядков величины.

Предположение об аномальном неупругом рассеянии УХН на поверхности с увеличением энергии до значений, значительно меньших тепловой энергии, как о причине дополнительных потерь УХН из ловушек, высказывалось достаточно давно [79]. Из-за малой энергии такие нейтроны были бы захвачены в конструкционных материалах установок и не достигли бы детекторов в установках, используемых в экспериментах, исследующих процесс нормального неупругого рассеяния [80, 81].

Наконец, в 1997 г. был обнаружен дополнительный канал потерь УХН из ловушек, связанный с их рассеянием с увеличением энергии при ударе о поверхность на величину около 10^{-7} эВ с вероятностью в диапазоне $10^{-8} - 10^{-5}$ на один удар [82, 83], на много порядков превышающую теоретически ожидаемую величину. Если энергия нейтрона после такого неупругого рассеяния превышает некоторую критическую величину, то он покидает ловушку. Этот процесс напоминает выпаривание УХН из ловушки, поэтому такие нейтроны стали называться ВУХН ("выпаривающиеся" УХН), а сам процесс, в отличие от хорошо известного нагрева в тепловую область, — малым нагревом УХН. В работе [82] был обнаружен и обратный эффект — уменьшение энергии УХН (охлаждение УХН) при их взаимодействии с поверхностью безводородного масла фомблин.

Для выбора механизма взаимодействия УХН с поверхностью, ответственного за наблюдаемый малый нагрев, из ряда предложенных теоретических моделей было проведено экспериментальное исследование параметров нового явления. Измерения велись с помощью Большого гравитационного спектрометра УХН, созданного специально для исследования малого нагрева УХН. Подробное описание спектрометра и метода измерений можно найти в работе [83]. Установка позволяет работать при температурах от 250°C до температуры жидкого азота, имеет конструкцию для быстрой смены исследуемых образцов (при комнатной температуре), комплект гравитационных барьеров разной высоты, возможность использования гравитационного барьера на входном нейтроноводе изменяемой высоты для работы с узкими начальными спектрами УХН. Имеется два типа поглотителя — титановый поглотитель для работы при нагревании спектрометра и полиэтиленовый поглотитель с развитой поверхностью, позволяющий максимально резко обрезать начальный спектр УХН, сокращая область энергий, где установка нечувствительна к малым изменениям энергии.

Измерения проводились как с поверхностью спектрометра, так и с различными образцами, помещёнными в спектрометр. Чувствительность установки на источнике УХН в Гренобле позволяет измерять вероятность малого нагрева на уровне 10^{-8} на удар о поверхность при площади образца около одного квадратного метра. В качестве образцов использовались фольги из различных материалов, прошедшие разную предварительную обработку; пластины монокристаллического сапфира; порошки нанодIAMAZOV; фольги, покрытые различными безводородными маслами.

В результате анализа экспериментальных данных представляется, что нужно говорить отдельно о малом нагреве на поверхности твёрдых тел и поверхностей жидкостей. Дело в том, что для твёрдых тел видна только одна гипотеза о механизме малого нагрева [86], объясняющая совокупность экспериментальных данных. Этот механизм заключается в неупругом рассеянии УХН на наночастицах, находящихся в относительно свободном состоянии у поверхности — в состоянии физической адсорбции [87, 88]. В то же время для поверхности жидкостей существуют альтернативные объяснения, например, рассеяние на вязкоупругих поверхностных волнах [89, 90].

Приведём перечень экспериментальных результатов и некоторых основанных на них выводов.

— Установлено, что исследуемый малый нагрев УХН является результатом однократного взаимодействия с поверхностью со средним увеличением энергии при отражении от поверхности металлов около 50 нэВ.

— Измеренная температурная зависимость потока ВУХН существенно слабее, чем для обычного фононного нагрева в тепловую область, но не противоречит, например, предположению о линейной зависимости генерации ВУХН от температуры.

— Установлено, что вероятность малого нагрева УХН на поверхности нержавеющей стали и меди может сильно зависеть от подготовки поверхности (температуры предварительного обезгаживания образцов, обработки реактивами). Максимальная вероятность в нашем случае достигала $(4,5 \pm 0,3) \times 10^{-6}$ на один удар о поверхность.

— Обнаружено, что при температуре, соответствующей резкому росту вероятности малого нагрева, на поверхности образцов образуется наноструктура с характерным размером зёрен около 10 нм.

— Отсутствует корреляция между вероятностью малого нагрева и коэффициентом потерь.

— В измерениях с монокристаллическим сапфиром установлено, что малый нагрев отсутствует на уровне чувствительности установки, при этом на поверхности сапфира не обнаружено наночастиц.

— Продемонстрировано, что нанесение на поверхность образца порошка наночастиц увеличивает вероятность малого нагрева на несколько порядков величины, причём спектральные и температурные зависимости малого нагрева аналогичны зависимостям, полученным с металлическими образцами, прошедшими температурную обработку.

— Наблюдаемая вероятность малого нагрева на жидкостях заметно выше, чем на твёрдых телах.

— Измерена температурная зависимость малого нагрева УХН на поверхности безводородных масел.

Анализ этих экспериментальных данных указывает, что наиболее вероятным процессом, который может объяснить совокупность полученных экспериментальных данных с твёрдыми образцами, является рассеяние УХН на свободных частицах (кластерах), если их размеры составляют порядка 10 нм, движущихся с тепловыми скоростями. При этом, независимо от распределения частиц по размерам, нейтроны сами "выбирают" наночастицы с размером порядка длины волны нейтрона, что позволяет однозначно указать наиболее вероятную передачу энергии на один удар — порядка 10^{-7} эВ при комнатной температуре ловушки [91].

Для жидкостей вопрос выбора механизма малого нагрева УХН пока не решён. Наблюдаемая температурная зависимость вероятности малого нагрева хорошо описывается в рамках гипотезы о рассеянии на поверх-

ностных волнах, в то время как спектральные измерения лучше описываются в рамках гипотезы о рассеянии на наночастицах у поверхности. В этой ситуации требуется дальнейшее развитие данной гипотезы для предсказания температурной зависимости.

4. Заключение

Использование нейтронов для физических исследований в ЛНФ ОИЯИ осуществляется уже на протяжении 60 лет. При этом нейтрон служит как объектом исследования, так и мощным инструментом при изучении свойств атомных ядер и конденсированных сред. В настоящее время создаются новые источники нейтронов с высокой плотностью потока тепловых нейтронов на основе протонных ускорителей, при этом реактор ИБР-2 остаётся в пятёрке самых "ярких" источников. Создаётся новый источник нейтронов на базе электронного ускорителя ИРЕН с длительностью импульса быстрых нейтронов 20–200 нс, частотой повторения 120 Гц и интегральным выходом до 10^{13} н с⁻¹. Установки для исследований конденсированных сред методами рассеяния нейтронов постоянно модернизируются, обновляется детекторная база, создаётся новая электроника для сбора, накопления и визуализации данных. Успешно реализуется программа прикладных исследований с использованием нейтронов: нейтронно-активационный анализ в науках о жизни, создание нейтронных и гамма-детекторов, исследования радиационной стойкости материалов и электронных компонентов. Результаты научных работ, полученные как в рамках реализации собственной исследовательской программы, так и программы пользователей, регулярно освещаются на научных мероприятиях — конференциях и школах, многие из которых проводятся на базе Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка.

Лаборатория нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований остаётся одним из мировых лидеров в области нейтронной физики.

Список литературы

1. Блохин Г Е и др. *Атомная энергия* **10** 437 (1961)
2. Франк И М, Препринт Р-674 (Дубна: ОИЯИ, 1961)
3. Франк И М *ЭЧАЯ* **2** 807 (1972)
4. Ананьев В Д и др., Препринт № 2372 (Дубна: ОИЯИ, 1965)
5. Ананьев В Д и др., Препринт № 13-4395 (Дубна: ОИЯИ, 1969)
6. Belikov O V et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **205** 012053 (2010)
7. Ананьев В Д и др. *Атомная энергия* **46** (6) 393 (1979); Anan'ev V D et al. *Sov. Atom. Energy* **46** 449 (1979)
8. Аксенов В Л *УФН* **179** 434 (2009); Aksenov V L *Phys. Usp.* **52** 406 (2009)
9. Драгунов Ю Г и др. *Атомная энергия* **113** (1) 29 (2012); Dragunov Yu G et al. *Atom. Energy* **113** 29 (2012)
10. Ananiev V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **320** 70 (2014)
11. Natkaniec I, Holderna-Natkaniec K, Kalus J *Physica B* **350** 651 (2004)
12. Шабалин Е П и др. *Атомная энергия* **97** (3) 183 (2004); Shabalin E P et al. *Atom. Energy* **97** 613 (2004)
13. Таран Ю В, Шапиро Ф Л *ЖЭТФ* **44** 2185 (1963); Taran Yu V, Shapiro F L *Sov. Phys. JETP* **17** 1467 (1963)
14. Алфименков В П и др. *Письма в ЖЭТФ* **35** 42 (1982); Alfimenkov V P et al. *JETP Lett.* **35** 51 (1982)
15. Шапиро С М, Стрелков А В *ЭЧАЯ* **26** 1420 (1995); Shapiro S M, Strelkov A V *Phys. Part. Nucl.* **26** 589 (1995)
16. Франк А И *ЭЧАЯ* **39** 880 (2008); Frank A I *Phys. Part. Nucl.* **39** 455 (2008)
17. Лушчиков В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **9** 40 (1969); Lushchikov V I et al. *JETP Lett.* **9** 23 (1969)
18. Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **86** 255 (2007); Frank A I et al. *JETP Lett.* **86** 225 (2007)
19. Frank A I et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **340** 012042 (2012)
20. Франк А И, Наумов В А *ЯФ* **76** 1507 (2013); Frank A I, Naumov V A *Phys. Atom. Nucl.* **76** 1423 (2013)
21. Frank A I et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **611** 314 (2009)
22. Алфименков В П и др. *Письма в ЖЭТФ* **52** 984 (1990); Alfimenkov V P et al. *JETP Lett.* **52** 373 (1990)

23. Стрелков А В *УФН* **174** 565 (2004); Strelkov A V *Phys. Usp.* **47** 511 (2004); Несвижевский В В *УФН* **174** 569 (2004); Nesvizhevskii V V *Phys. Usp.* **47** 515 (2004)
24. Балагуров А М *ЭЧАЯ* **26** 1620 (1995); Balagurov A M *Phys. Part. Nucl.* **26** 678 (1995)
25. Алфименков В П, Пикельнер Л Б *ЭЧАЯ* **26** 1524 (1995); Alfimenkov V P, Pikel'ner L B *Phys. Part. Nucl.* **26** 637 (1995)
26. Попов Ю П *ЭЧАЯ* **34** 448 (2003); Popov Yu P *Phys. Part. Nucl.* **34** 229 (2003)
27. Аксенов В Л *ЭЧАЯ* **31** 1303 (2000); Aksenov V L *Phys. Part. Nucl.* **31** 651 (2000)
28. Горшкова Ю Е (Сост.), Козленко Д П (Ред.), Предложения в программу развития комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2 на 2015–2020 гг. (ОИЯИ, 2014–86) (Дубна: ОИЯИ, 2014)
29. Белушкин А В, Козленко Д П, Рогачев А В *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед.* **9** 18 (2011)
30. Bobrikov I A et al. *J. Power Sources* **258** 356 (2014)
31. Bloch D J. *Phys. Chem. Solids* **27** 881 (1966)
32. Козленко Д П и др. *Письма в ЖЭТФ* **82** 212 (2005); Kozlenko D P et al. *JETP Lett.* **82** 193 (2005)
33. Kozlenko D P et al. *Phys. Rev. B* **78** 054401 (2008)
34. Муругова Т Н и др. *Кристаллография* **52** 545 (2007); Murugova T N et al. *Crystallogr. Rep.* **52** 521 (2007)
35. Belushkin A V, Kozlenko D P *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* **1** 023002 (2010)
36. Vokuchava G, Papushkin I, Petrov P *Comptes Rendus Acad. Bulgare Sci.* **67** 763 (2014)
37. Авдеев М В, Аксенов В Л *УФН* **180** 1009 (2010); Avdeev M V, Aksenov V L *Phys. Usp.* **53** 971 (2010)
38. Khaydukov Yu N et al. *J. Supercond. Nov. Magn.* **24** 961 (2011)
39. Киселев М А *ЭЧАЯ* **42** 578 (2011); Kiselev M A *Phys. Part. Nucl.* **42** 302 (2011)
40. Кичанов С Е и др. *ФТТ* **55** 745 (2013); Kichanov S E et al. *Phys. Solid State* **55** 813 (2013)
41. Burzo E et al. *J. Alloys Comp.* **551** 702 (2013)
42. Kozlenko D P, Burzo E, Vlaic P *Sci. Rep.* **5** 8620 (2015)
43. Родкин М В, Никитин А Н, Васин Р Н *Сейсмотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах* (М.: ГЕОС, 2009)
44. Колесов В Ф *Апериодические импульсные реакторы Т. 2* (Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007) с. 449; Пер. на англ. яз. 1-го изд.: Kolesov V F *Aperiodic Pulse Reactors* Rev. ed. (Sarov, Russia: RFNC-VNIIEF, 2006)
45. De Hoffman F, Whittermore W, in *Properties of Matter under Unusual Conditions. In Honor of Edward Teller's 60th Birthday* (Eds H Mark, S Fernbach) (New York: Interscience Publ., 1969) p. 119
46. Pokotilovski Yu N et al., in *Proc. of the Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors, Washington, D.C., November 13–17, 1994* (La Grande Park, Ill.: American Nuclear Society, 1994) p. 343
47. Будник А Д и др., Препринт № 33-97-20 (Дубна: ОИЯИ, 1997)
48. Леваков Б Г и др. *Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ–ВНИИТФ* (Под ред. А В Лукина) (Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 2002) с. 262
49. Багрянов Б В и др. *Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии: междунар. науч.-техн. конф., г. Дмитровград, 25–29 июня 2001 г. Сборник докладов* (Дмитровград: ФГУП ГНЦ НИИАР, 2001)
50. Bowman C D et al., in *Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. 8th Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, May 17–20, 2000* (JINR Report E3-2000-192) (Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2000) p. 245
51. Levakov B G et al., in *Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. 9th Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, May 23–26, 2001* (JINR Report E3-2001-192) (Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2001) p. 27
52. Furman W I et al. *J. Phys. G* **28** 2627 (2002)
53. Sharapov E I et al. *AIP Conf. Proc.* **680** 261 (2003)
54. Mitchell G E et al., in *Proc. of ICANS XVI. The 16th Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12–15, 2003* (Eds G Mank, H Conrad) (Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, 2003) p. 79
55. Crawford B E et al. *J. Phys. G* **30** 1269 (2004)
56. Mitchell G E et al. *J. Res. NIST* **110** (3) 225 (2005) papers presented at the April 2004 Intern. Conf. on Precision Measurements with Slow Neutrons at NIST
57. Mitchell G E et al., in *Proc. of the 17th Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources, Santa Fe, NM, USA, April 24–29, 2005* (LA-UR, 06-3904, Eds G J Russell, J J Rhyne, B V Maes) (Los Alamos: LANL, 2006)
58. Mitchell G E et al. *Braz. J. Phys.* **35** 850 (2005)
59. Sharapov E I et al., in *Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics, ISINN-13 Dubna May 25–28, 2005* (JINR Report E3-2006-7) (Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2006) p. 130
60. Muzhychka A Yu et al. *Nucl. Phys. A* **789** 30 (2007)
61. Stephenson S L et al. *Nucl. Phys. A* **895** 33 (2012)
62. Snow W M *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **110** 189 (2005)
63. Desplanques B, Donoghue J F, Holstein B R *Ann. Physics* **124** 449 (1980)
64. Дубовик В М, Зенкин С В, Обуховский И Т, Тосунян Л А *ЭЧАЯ* **18** 575 (1987); Dubovik V M, Zenkin S V, Obukhovskii I T, Tosunyan L A *Sov. J. Part. Nucl.* **18** 244 (1987)
65. Feldman G B et al. *Phys. Rev. C* **43** 863 (1991)
66. Kaiser N, Meissner U-G *Nucl. Phys. A* 499 (1989)
67. Holstein B R *Nucl. Phys. A* **737** 85 (2004)
68. Нестеров М М, Окунев И С *Письма в ЖЭТФ* **48** 573 (1988); Nesterov M M, Okunev I S *JETP Lett.* **48** 621 (1988)
69. Igashov S Yu, Sinykov A V, Tchuvisky Yu M, in *Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. XI Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-11, Dubna, May 28–31, 2003* (Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2004) p. 34
70. Весна В А и др. *Письма в ЖЭТФ* **82** 519 (2005); Vesna V A et al. *JETP Lett.* **82** 463 (2005)
71. Vesna V A et al. *Phys. Rev. C* **77** 035501 (2008)
72. Vesna V A et al. *Nucl. Phys. A* **827** 425 (2009)
73. Vesna V A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **611** 244 (2009)
74. Весна В А, Гледенов Ю М, Седышев П В, Шулгина Е В *ЖТФ* **80** (11) 140 (2010); Vesna V A, Gledenov Yu M, Sedyshev P V, Shul'gina E V *Tech. Phys.* **55** 1687 (2010)
75. Vesna V A et al. *Eur. Phys. J. A* **47** 43 (2011)
76. Ramsey-Musolf M J, Page S A *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **56** 1 (2006)
77. Serebrov A P et al. *Phys. Rev. C* **78** 035505 (2008)
78. Baker C A et al. *Phys. Rev. Lett.* **97** 131801 (2006)
79. Стрелков А В, в сб. *Докл. VI Междунар. школы по нейтронной физике, Алжир, 8–18 октября, 1990 г.* (Дубна: ОИЯИ, 1991) с. 325
80. Стрелков А В, Хейцельт М *ЖЭТФ* **74** 23 (1978); Strelkov A V, Hetzelt M *Sov. Phys. JETP* **47** 11 (1978)
81. Игнатович В К и др., Сообщение P3-82-811 (Дубна: ОИЯИ, 1982)
82. Nesvizhevsky V V et al. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **6** 151 (1999)
83. Nesvizhevsky V V et al. *ЯФ* **62** 832 (1999); *Phys. Atom. Nucl.* **62** 776 (1999)
84. Arzumanov S et al., in *Proc. of IV Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-6, Dubna, May 13–16, 1998* (JINR Report, E3-98-2002) (Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2000)
85. Kartashov D G et al. *Int. J. Nanosci.* **6** 501 (2007)
86. Несвижевский В В *ЯФ* **65** 426 (2002); Nesvizhevsky V V *Phys. Atom. Nucl.* **65** 400 (2002)
87. Canaguier-Durand A et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 230404 (2009)
88. Canaguier-Durand A et al. *Phys. Rev. A* **83** 032508 (2011)
89. Pokotilovski Yu N *Phys. Lett. A* **255** 173 (1999)
90. Lamoreaux S K, Golub R *Phys. Rev. C* **66** 044309 (2002)
91. Несвижевский В В и др. *Кристаллография* **58** 730 (2013); Nesvizhevsky V V et al. *Crystallogr. Rep.* **58** 743 (2013)

Neutron physics at the INR — 60 years of the I.M. Frank Neutron Physics Laboratory

E.V. Lychagin, D.P. Kozlenko, P.V. Sedyshev, V.N. Shvetsov. Joint Institute for Nuclear Research, Laboratory of Neutron Physics, ul. Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation
Tel. +7 (49621) 65 925. Fax +7 (49621) 65 429. E-mail: shv@nf.jinr.ru

26 March, 2016 will mark 60 years since the Joint Institute for Nuclear Research was founded in 1956 within which the Laboratory of Neutron Physics was established. Already four years later, in 1960, the world's first pulsed fast reactor (known by its Russian acronym as IBR) operating in a periodic mode was put into operation, followed in 1984 by IBR-2. The Lab's highlight achievements over the last decade are summarized, the state-of-the-art laboratory hardware is discussed, and the prospects for the future are reviewed.

Keywords: pulsed fast reactor, neutrino scattering, neutron–neutrino scattering, space parity violation in neutron reactions, cold neutrons

PACS numbers: **28.20.–v**, 29.25.Dz, 61.05.F–
Bibliography — 91 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (3) 265–274 (2016)

DOI: 10.3367/UFNR.0186.201603c.0265
Received 6 July 2015, revised 23 November 2015
Physics – Uspekhi **59** (3) (2016)