

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ им. И. М. ФРАНКА

Научная программа Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в 2007 г. охватывала пять тем Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного научно-технического сотрудничества ОИЯИ. Она была направлена на получение новых результатов по физике конденсированных сред (тема «Нейтронные исследования структуры и динамики конденсированных сред», 07-4-1031-99/2008, руководители В. Л. Аксенов и А. М. Балагуров); по нейтронной ядерной физике (тема «Нейтронная ядерная физика — фундаментальные и прикладные исследования», 06-4-1036-2001/2010, руководители В. Н. Швецов и Ю. Н. Копач). Для обеспечения физических исследований осуществлялось развитие и создание базовых установок лаборатории: ИБР-2 (тема «Развитие и совершенствование комплекса ИБР-2», 07-4-851-87/2010, руководители А. В. Белушкин и А. В. Виноградов) и ИРЕН (тема «Создание установки ИРЕН (Проект ИРЕН)», 06-4-0993-94/2008, руководители В. Н. Швецов и В. Г. Пятаев), а также развитие комплекса спектрометров ИБР-2 (тема «Разработка и создание элементов нейтронных спектрометров для исследования конденсированных сред», 07-4-1052-96/2008, руководители А. В. Белушкин и В. И. Приходько). ЛНФ также принимала участие в разработке темы ОИЯИ «АТЛАС. Общецелевой *pp*-эксперимент на большом адронном коллайдере

в ЦЕРН» (тема 02-0-1007-94/2008, руководитель Н. А. Русакович).

Ключевые проблемы исследований, проведенных в сотрудничестве с руководящими ядерными центрами, рассматривались на XIV Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами и на заседании Форума по сотрудничеству органов регулирования и совершенствования ядерной и радиационной безопасности исследовательских ядерных установок. Участие ученых ЛНФ в специализированных международных проектах обсуждалось на XX Сессии комиссии ООН по трансграничному переносу воздушных загрязнений в Европе и на конференции Европейского сообщества по разработке новых методов исследований в сельском хозяйстве. Новые шаги в применении систем контроля и обеспечении качества были предприняты в ЛНФ во время Первого рабочего совещания в рамках Технической кооперации с МАГАТЭ по гармонизации системы контроля качества в лабораториях РФ, использующих ядерно-физические аналитические методы. Второй объединенный семинар-школа ОИЯИ–Румыния по нейтронной физике для исследований ядер, конденсированных сред и наук о жизни предоставил молодым ученым из Румынии и ОИЯИ возможность познакомиться с прикладной и теоретической нейтронной физикой, получить больше информации о деятельности ОИЯИ и установить контакты для будущих коллабораций.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В связи с остановкой реактора ИБР-2 для проведения очередного этапа реконструкции задачи коллектива отдела и планы работ по теме на 2007 г. заметно отличались от традиционных. А именно, научная работа была перенесена в родственные центры в России и за рубежом, работы на ИБР-2 концентри-

ровались на выполнении программы модернизации спектрометров.

Согласно перспективному плану работ по темам фундаментальных и прикладных направлений, разрабатываемых сотрудниками отдела НИКС ЛНФ, в 2007 г. были оставлены несколько основных, ра-

бота по которым в других научных центрах, прежде всего нейтронных и синхротронных, была обеспечена существующими соглашениями о сотрудничестве. В 2007 г. начат первый этап модернизации спектрометров на реакторе ИБР-2.

Научные результаты. Атомная и магнитная структура составов $(La_{1-y}Pr_y)_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ изучена как функция y в диапазоне $y = 0,2-1$ в области перехода металл–изолятор в зависимости от содержания изотопов кислорода ^{16}O и ^{18}O . Получены количественные характеристики влияния на поляронное сужение зоны проводимости микронапряжений в решетке и объемной доли мезоскопических ферро- и антиферромагнитных кластеров. Хорошо выраженный провал в температуре перехода в упорядоченное магнитное состояние и подавление всех типов дальнего магнитного порядка вблизи точки перехода металл–изолятор при $y = 0,9$ указывает на ключевую роль химического беспорядка в структуре в формировании фазово-расслоенного состояния на мезоскопическом масштабе размеров [1].

Проведено исследование [2] структурных изменений, переходов между различными спиновыми состояниями ионов Co^{3+} и перехода диэлектрик–металл в кобальтите лантана $LaCoO_3$ в широком диапазоне температур 10–900 К и давлений 0–20 ГПа. Установлено, что под давлением происходит резкое подавление магнитного промежуточно-спинового состояния ($S = 1$) и стабилизация немагнитного низкоспинового состояния ($S = 0$) ионов Co^{3+} . Температура перехода диэлектрик–металл существенно возрастает под давлением.

Исследована возможность использования коротких монокарбоксильных кислот ($C_{12}H_{24}O_2$ и $C_{14}H_{28}O_2$) для стабилизации наночастиц магнетита в магнитных жидкостях на основе неполярных органических растворителей [3]. Показано, что они могут быть использованы для получения высокостабильных образцов. Проведено сравнение структуры новых образцов с магнитными жидкостями, стабилизированными ненасыщенной олеиновой кислотой $C_{18}H_{34}O_2$. Данные по намагниченности и малоугловому рассеянию нейтронов выявили существенные различия в функции распределения по размерам стабилизированного магнетита: уменьшение среднего радиуса частиц и индекса полидисперсности при переходе от олеиновой кислоты к коротким кислотам. Из сравнения эффективной толщины и плотности оболочек кислот вокруг магнетита следует, что наблюдаемый эффект регулирования размера связан с различной организацией кислот на поверхности магнетита.

На спектрометре РЕМУР методом рефлектометрии нейтронов с использованием стоячих волн поляризованных нейтронов выполнены исследования ферромагнитно-сверхпроводящей составной структуры $V(39 \text{ нм})/Fe(3,2 \text{ нм})/10 \times [V(3,2 \text{ нм})/Fe(3,2 \text{ нм})]$, состоящей из сверхпроводящего слоя вана-

дия $V(39 \text{ нм})$ и периодической структуры $10 \times [V(3,2 \text{ нм})/Fe(3,2 \text{ нм})]$ [4]. Впервые при переходе слоя ванадия в сверхпроводящее состояние наблюдались явления образования доменной структуры в окрестности границы раздела ванадий–железо и антиферромагнитное упорядочение в периодической структуре. Таким образом, показано, что магнитным состоянием наноструктуры можно управлять с помощью сверхпроводящего перехода. Это открывает возможности разработки принципиально новых логических элементов для наноэлектроники, в которых состояние кодируется и по величине магнитного момента, и по сопротивлению.

Исследованы магнитные и магнитотранспортные свойства композитных наногранулированных пленок на основе кобальта. В нанокompозитных сплавах $(Co)_x(SiO_2)_{1-x}$ в области перколяции обнаружен магнитный фазовый переход с образованием фрактальных структур. Полученные экспериментальные данные [5] свидетельствуют о том, что в нанокompозитных гранулированных системах в области перколяционного перехода образуются магнитные фрактальные структуры, которые и определяют магнитные свойства композитов, в том числе и магнитосопротивление.

Дифракция нейтронов является исключительно эффективным методом изучения структуры биологических и модельных липидных мембран. В частности, с помощью вариации содержания легкой и тяжелой воды удается надежно определять фазы структурных факторов. Еще одним благоприятным обстоятельством является возможность проводить эксперименты в режиме *in situ* в реальном времени. Так, на дифрактометре ДН-2 удается проследить за изменениями структуры мембраны в ходе гидратации с разрешением по времени на уровне 1 мин. В 2007 г. получены экспериментальные доказательства явления укрепления липидной матрицы верхнего слоя кожи человека *stratum corneum* (SC) молекулами церамида б. В серии экспериментов, выполненных методом дифракции нейтронов, было установлено [6], что сверхсильное межмембранное взаимодействие, создаваемое молекулами церамида б, не может быть разрушено ни длинноцепочечными церамидами, ни длинноцепочечными жирными кислотами. Эксперименты, выполненные методом малоуглового рассеяния нейтронов, показали, что взаимодействие, создаваемое молекулами церамида б, является короткодействующим. Устойчивость разработанной мембраны SC к вариации биохимического состава липидов и водных растворов позволила начать эксперименты по исследованию веществ, увеличивающих проницаемость кожи человека для транспортировки лекарств.

Широко используемый в медицине антибиотик (амфотерицин В) (АМВ) изучался с помощью малоуглового рассеяния нейтронов, рентгеновской дифракции и фурье-спектроскопии. Результаты экспе-

риментов показали [7], что АмВ преимущественно локализуется вблизи головных групп мембраны при концентрациях ниже одного мольного процента. При концентрации выше этого уровня происходит процесс агрегации. Появляется эффект ассоциации и происходит встраивание антибиотика в гидрофобную мембранную часть.

Впервые показано [8] существование открытых внутренних полостей в эффективном объеме дендримера, доступных растворителю, и рассчитана их объемная доля. Показано, что концевые группы дендримера локализованы в его поверхностном слое. Данные малоуглового рассеяния позволили получить размеры и восстановить внешнюю форму дендримеров различных генераций для трех и четырех функциональных дендримеров. Из новой модели структуры дендримера следует, что его внутренняя сфера является проницаемой для растворителя, причем его плотность понижается как минимум в два раза.

Проведено комплексное изучение [9] физических свойств синтетического монокристаллического кварца и кварцевого порошка в температурной области α - β -перехода методами нейтронной дифракции и механической спектроскопии. Получены новые данные по поведению параметров элементарной ячейки кварцевых порошков двух фракций с разной средней величиной зерен при комнатной температуре и в температурном интервале 540–620 °С, а также координаты атомов в элементарной ячейке. Установлено, что параметры решетки у порошков, отличающихся размером зерен на порядок, заметно различаются. Температура α - β -фазового перехода у мелкозернистого порошка больше, чем у крупнозернистого на ≈ 15 °С (лежит в интервале 580–585 °С).

Методические результаты. В 2007 г. на ИБР-2 началась реконструкция нейтронной системы спектрометров СКАТ, «Эпсилон» и НЕРА. Работа ведется в рамках совместного проекта ВМБФ с сотрудниками отделов НИКС и КС. По согласо-

ванному техническому заданию выполнено эскизное проектирование механических и оптических узлов нейтронной системы и проведена привязка существующих конструкций нейтронных каналов, расположенных в кольцевом коридоре и экспериментальном зале, к реальным строительным конструкциям.

На канале 10 ИБР-2 вместо существующего спектрометра KDSOG вскоре будет начато сооружение многофункционального рефлектометра GRAINS. Принципиальной особенностью рефлектометра является использование вертикальной плоскости рассеяния, что позволяет изучать отражение от жидких сред. На рефлектометре будет использован TOF-метод, что позволит проводить эксперименты при фиксированных ориентациях первичного пучка и образца. В дополнение к рефлектометрической моде на GRAINS предполагается изучать незеркальное отражение и малоугловое рассеяние поляризованных нейтронов. В 2007 г. разработана детальная схема рефлектометра, одобренная Программным комитетом, и проведены модельные расчеты.

В рамках протокола о сотрудничестве с РИЦ «Курчатовский институт» начато проектирование нейтронного дифрактометра для изучения внутренних напряжений в объемных изделиях на реакторе ИР-8. Концепция дифрактометра предполагает использование современных технологий формирования нейтронного пучка и детектирования рассеянных нейтронов. Этот дифрактометр обеспечит комплексные возможности по отношению к существующему на ИБР-2 стресс-дифрактометру FSD.

Для дальнейшего развития экспериментальной базы на ИБР-2 и в рамках сотрудничества с корпорацией NECSA (ЮАР) реализован контракт на приобретение автоматизированной нагрузочной машины. Машина позволяет проводить on-line эксперименты с широким набором режимов нагрузки (стационарной или циклической) на любом типе нейтронных дифрактометров с объемными образцами металлов и сплавов.

НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Изучение фундаментальных свойств нейтрона. Закончена обработка результатов эксперимента по измерению гравитационной силы $F_g = m_g a$, действующей на нейтрон в поле тяжести Земли (m_g — гравитационная масса нейтрона, a — ускорение его свободного падения) [10]. Методика эксперимента основана на применении квантовых устройств: движущейся дифракционной решетки, используемой в качестве фазового модулятора нейтронной волны, и нейтронных интерферометров Фабри–Перо. Идея эксперимента состоит в сравнении изменения кинетической энергии нейтрона $\Delta E = m_g a \Delta H$ при

его свободном падении с высоты ΔH с величиной кванта энергии $E = \hbar \Omega$, отнимаемого у нейтрона при дифракции в -1 порядок на движущейся решетке. Полученное в эксперименте значение величины $m_g a$ совпадает с величиной mg , где m — табличное значение массы нейтрона, а g — локальное значение ускорения свободного падения для макроскопических тел в месте проведения эксперимента. Для отношения этих величин $\gamma = m_g / m_g a$, характеризующего степень справедливости слабого принципа эквивалентности для нейтрона, получено значение $1 - \gamma = (1,8 \pm 2,1) \cdot 10^{-3}$.

Проведен новый эксперимент по изучению эффекта ускоряющейся среды в нейтронной оптике. Этот эффект состоит в изменении частоты волны, прошедшей через преломляющийся образец, движущийся с ускорением. Существование эффекта было теоретически предсказано для электромагнитных волн в работе Танака в 1982 г. и для нейтронных волн в работах Ковальского (1993) и Носова и Франка (1998). В случае нейтронных волн изменение энергии описывается выражением $\Delta E \cong mwd \frac{1-n}{n}$. Здесь m — масса нейтрона, w — ускорение образца, направленное по скорости нейтрона, d — толщина образца, n — показатель преломления вещества образца. Эффект имеет очень общую природу, однако наблюдался лишь для нейтронных волн. Его первое наблюдение было осуществлено группой ОИЯИ–«Курчатовский институт»–ILL в 2005 г. В эксперименте 2007 г. получены новые убедительные данные, позволяющие с полной уверенностью говорить о том, что существование эффекта доказано.

Основным результатом за 2007 г., достигнутым в рамках деятельности по подготовке и проведению эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне на реакторе ЯГУАР (РФЯЦ, ВНИИТФ, г. Снежинск) [11] является создание нейтронного детектора, удовлетворяющего всем требованиям эксперимента. Необходимо отметить, что эти требования весьма жесткие. Никогда ранее не создавались нейтронные детекторы, совмещающие высокую скорость счета ($\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$), эффективность регистрации нейтронов $\sim 100\%$, высокое энергетическое разрешение (не хуже 10%) и низкую чувствительность к γ -квантам $\sim 10^{-9}$. Детектор был смонтирован на экспериментальной установке и прошел успешное испытание в калибровочных измерениях на газах в импульсном режиме работы реактора ЯГУАР. Таким образом, в настоящее время установка для измерения nn -рассеяния полностью готова.

В 2005 г. было экспериментально показано, что алмазные наночастицы могут быть использованы в качестве эффективного отражателя очень холодных нейтронов (энергий 10^{-6} – 10^{-4} эВ). В рамках изучения возможности создания эффективного источника УХН нового типа, основанного на термализации очень холодных нейтронов до энергии УХН, в 2007 г. проводились прецизионные измерения альбедо очень холодных нейтронов от слоя алмазных наночастиц методом хранения в ловушке, стенки которой сделаны из наноалмазов. Численные оценки показывают, что можно ожидать альбедо на уровне 99% для нейтронов со скоростью 40 м/с , и более 90% для нейтронов со скоростью 100 м/с от слоя толщиной $\sim 2 \text{ см}$. Для проведения этих измерений была изготовлена алмазная ловушка весом в $100\,000$ карат.

Закончены измерения и обработаны экспериментальные данные по генерации ультрахолодных нейтронов на импульсном реакторе TRIGA–Майнц (совместно с группами из Мюнхена и Майнца). Нейтроны генерировались в твердой дейтериевой мишени при температуре 6 – 10 К и транспортировались по зеркальному нейтроноводу длиной 6 м . В части экспериментов использовался мезитиленовый предзамедлитель при температуре 20 К . При импульсе реактора 10 МДж количество зарегистрированных нейтронов с энергией ниже 200 нэВ превышало 10^5 .

На реакторе ИБР-2 ЛНФ проведены эксперименты и обработаны результаты по исследованию динамических свойств фторполимеров при низких температурах [12]. Эти вещества используются для покрытия стенок ловушек ультрахолодных нейтронов. На основе восстановленного спектра возбуждений вычислены ожидаемые коэффициенты потерь нейтронов при хранении и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Исходя из предположения, что нейтронная волновая функция представляется волновым пакетом, поставлен вопрос: изменяется ли ширина пакета с ростом энергии или нет? Для ответа на этот вопрос был проведен эксперимент по определению температурной зависимости сечения рассеяния медленных нейтронов в газе ^4He . Из результатов эксперимента следует, что ширина волнового пакета уменьшается с ростом энергии обратно пропорционально скорости нейтрона.

Исследование нарушений фундаментальных симметрий в нейтронно-ядерных взаимодействиях. В рамках экспериментов по поиску нейтральных токов в нуклон-нуклонных взаимодействиях и определении слабой π -мезонной константы связи проведены измерения (в коллаборации с ПИЯФ, ILL и Техническим университетом Мюнхена) P -нечетной асимметрии γ -квантов реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}^* \rightarrow ^7\text{Li} + \gamma$ на пучке холодных поляризованных нейтронов PF1b (ILL, Гренобль). В измерении применялась новая система регистрации токовых сигналов. Метод позволяет производить процедуру, аналогичную интегрированию сигнала, за значительно более короткие промежутки времени, чем аналоговые интеграторы. Это позволило уйти из низкочастотной области, где вклад флуктуаций мощности реактора и шумов максимален, и уменьшить погрешность определения эффекта более чем в $1,5$ раза. Суммарное по трем циклам значение асимметрии (предварительное) $\alpha_\gamma = (4,5 \pm 2,7) \cdot 10^{-8}$.

Завершен анализ результатов контрольных экспериментов по поиску отрицательного нейтронного p -резонанса у изотопов свинца, проведенных в 2005–2006 гг. на 1-м канале реактора ИБР-2. Сделана оценка возможных параметров этого резонанса.

На ускорителе ЭГ-5 ЛНФ продолжались эксперименты по измерению P -четных угловых корреляций в реакции $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ в области энергий нейтронов

до 1 МэВ [13]. Для спектрометрии квазимоноэнергетических нейтронов с энергией ~ 100 кэВ — 1 МэВ, производимых в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ на тонких литиевых мишенях, сконструирована специальная ионизационная камера с ${}^3\text{He}$ в составе рабочего газа. Проводятся ее испытания.

Исследования физики деления и других ядерных реакций. Получены первые результаты эксперимента по исследованию реакции ${}^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, проведенного в 2006 г. на реакторе ИБР-2 с использованием двухплечевого времяпролетного спектрометра тяжелых ионов мини-FOBOS. В распределении «масса–масса» осколков деления выявлены различные особенности, которые можно интерпретировать как наличие нового канала многотельного распада, подобного тому, что наблюдался ранее в ${}^{252}\text{Cf}(sf)$. В распределении «полная кинетическая энергия–масса фрагментов» также выявлены тонкие структуры, схожие с уже найденными ранее для других делящихся систем.

Из экспериментальных данных, полученных ранее, определены энергетические распределения и выходы легких заряженных частиц (от ${}^3\text{H}$ до изотопов углерода) для спонтанного деления ${}^{252}\text{Cf}(sf)$ и нейтронно-индуцированного деления ${}^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. Для изотопов тяжелее лития такие данные получены впервые.

На реакторе ILL в Гренобле был проведен эксперимент по исследованию недавно обнаруженного эффекта вращения делящихся ядер под действием холодных поляризованных нейтронов (ROT-эффекта). Эффект проявляется в изменении угловых распределений α -частиц, испускаемых в процессе тройного деления, в зависимости от направления поляризации налетающих нейтронов. Предполагается, что изменение угловых распределений α -частиц обусловлено компонентой вращения делящейся системы вокруг вектора полного углового момента компаунд-ядра, привносимой спином налетающего нейтрона. В эксперименте подтверждены данные, полученные ранее в пионерских экспериментах.

Завершена обработка экспериментальных данных, полученных на 11-м канале реактора ИБР-2 в продолжение исследований характеристик запаздывающих нейтронов деления главных и минорных реакторных изотопов [14]. Полученное значение полного выхода запаздывающих нейтронов при делении изотопа ${}^{245}\text{Cm}$ тепловыми нейтронами $\nu_d = (0,64 \pm 0,02)\%$ является вторым известным экспериментальным результатом и отличается от него вдвое более высокой точностью. Проведенное сравнение этого результата с глобальной систематикой выходов запаздывающих нейтронов показало, что он совпадает со значением, полученным в рамках упрощенного варианта этой систематики.

В рамках программы по изучению механизмов ядерных реакций и получению данных для ядерной

энергетики на ускорителе ЭГ-4.5 Института физики тяжелых ионов при Пекинском университете (Китай) проведены исследования реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ при $E_n = 1,23, 1,70, 2,05, 2,47$ МэВ и ${}^{64}\text{Zn}(n, \alpha){}^{61}\text{Ni}$ при $E_n = 2,5$ МэВ. Получены энергетические спектры и угловые распределения α -частиц, данные обрабатываются. Работы проводятся совместно с Пекинским университетом, Лодзинским университетом (Польша), Университетом Улан-Батора (Монголия).

Продолжен комплексный анализ экспериментальных данных о процессе каскадного γ -распада нейтронных резонансов. Выполненная ранее аппроксимация полученных в ЛНФ ОИЯИ данных о плотности уровней в фиксированном спиновом окне показала, что свойства этого параметра любого ядра ниже энергии связи нейтрона полностью определяются разрывом от 3 до 5 куперовских пар нуклонов. Аппроксимация экспериментальных данных о парциальных ширинах первичных дипольных γ -переходов в том же интервале энергий подтвердила этот вывод: свойства ядра определяются сосуществованием и взаимодействием в ядре возбуждений фермионного и бозонного типа. Таким образом, продемонстрирована возможность и необходимость прямого экспериментального и теоретического изучения сверхтекучности нагретого ядра до его температуры не ниже 0,5 МэВ.

Прикладные работы. В секторе нейтронного активационного анализа (НАА) совместно с Институтом физики им. Э. Андроникашвили (Тбилиси, Грузия) и Лоуренсовской лабораторией (Беркли, США) ведутся исследования по биотехнологии с использованием различных микроорганизмов для очистки окружающей среды от токсичных металлов. В 2007 г. с применением эпителивого НАА на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ продолжены работы по изучению возможности использования сине-зеленой микроводоросли *Spirulina platensis* и бактерий рода *Arthrobacter*, выделенных из природных базальтов, для восстановления токсичной формы хрома Cr(VI) до стабильной, нетоксичной формы Cr(III) [15].

На пучках заряженных частиц ускорителя ЭГ-5 ЛНФ проводились аналитические исследования с использованием неразрушающих ядерно-физических методик: RBS (метод резерфордовского обратного рассеяния) и ERD (метод ядер отдачи). Измерялись глубинные профили различных элементов, начиная от водорода и дейтерия вплоть до гадолиния и вольфрама, анализировались нанослой металлов, нанесенные на кремниевые подложки, образцы слоистых структур с толщинами слоев до 1–2 мкм, кремниевые образцы, насыщенные водородом и дейтерием, образцы модифицированных конструкционных материалов [16, 17]. Работы выполнялись в сотрудничестве с Воронежским университетом, СИМП (Сумы, Украина), ЭИ САН (Братислава, Словакия), УМКС и ЛУТ (Люблин, Польша).

ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Импульсный реактор ИБР-2: Работы по модернизации ИБР-2, начиная с декабря 2006 г. после остановки реактора, ведутся в соответствии с «Программой работ на реакторе ИБР-2 в режиме временного останова (2007–2010 гг.)» по квартальным планам, утверждаемым главным инженером ЛНФ.

К настоящему времени полностью готовы для реактора ИБР-2М:

- подвижный отражатель ПО-3;
- топливная загрузка;
- конструкторская документация по всему реакторному оборудованию.

1. Работы по демонтажу ИБР-2:

- Главная задача 2007 г. по графику модернизации — разгрузка активной зоны ИБР-2 и отмывка выгруженных ТВС от натрия. Эта работа после тщательной подготовки была начата 12.03.2007 г. и успешно завершена 22.06.2007 г.

- 06.07.2007 г. был дренирован натрий из I и II контуров. Оборудование и трубопроводы натриевых контуров заполнены аргоном.

- Исполнительные механизмы СУЗ и ионизационные камеры демонтированы и размещены в хранилище.

- Удалены от реактора откатные защиты.

- Подвижный отражатель удален от реактора. Смонтированы временные коммуникации для подачи в ПО-3 гелия и масла, что обеспечивает режим временной консервации.

- Выполнена фиксация корпуса реактора перед его удалением в верхней и нижней частях.

- Демонтированы водяной замедлитель за ПО и наклонный замедлитель.

- Демонтированы трубы охлаждения стационарных отражателей.

- Демонтирована хвостовая часть канала мишени и захват фиксации корпуса реактора.

- Трубопроводы натриевого охлаждения (напорный и сливной коллекторы) отрезаны от корпуса реактора. Выполнен комплекс мер для удаления корпуса ИБР-2.

2. СУЗ ИБР-2М:

- Продолжалось изготовление в СНИИП-СИСТЕМАТОМ штатного комплекта АСУЗ, а также пульта управления реактором, системы контроля технологических параметров (ИНЭУМ).

- В ОП ОИЯИ изготовлены штатные исполнительные механизмы (ИМ) для органов регулирования КО и РР и опытный образец ИМ АЗ, ведется изготовление штатных ИМ АЗ и АР.

- На стенде ЛНФ завершены ресурсные испытания опытного образца ИМ КО и АЗ.

- 3. В НИКИЭТ продолжалось изготовление нового корпуса. Внутрикорпусное перегрузочное устройство ТВС доставлено в ЛНФ.

- 4. В ОП ОИЯИ завершено изготовление откатных защит, стационарных отражателей и блоков регулирования в стационарном отражателе. Выполнена контрольная сборка этого комплекса оборудования. Указанное оборудование принято комиссией с участием НИКИЭТ и Ростехнадзора.

5. Комплекс криогенных замедлителей:

- Изготовлена КГУ-700 («Гелиймаш»);

- выпущен технический проект КЗ (НИКИЭТ);

- ведется изготовление криогенных трубопроводов в «Гелиймаше»;

- в НИКИЭТ ведется разработка КД для КЗ 202 (пучки 7–11);

- в ОП ОИЯИ начато изготовление водяных замедлителей.

На обеспечение работ по модернизации ИБР-2 в 2007 г. было израсходовано на 01.12.2007 г. около 780 тыс. долл. США, что составляет 90 % от плана года.

Проект ИРЕН. Главными задачами Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории физики частиц в 2007 г. являлись создание инженерной инфраструктуры и монтаж имеющегося оборудования первой очереди ускорителя ЛУЭ-200.

1. *Создание инженерной инфраструктуры.* В течение 2007 г. в соответствии с утвержденным планом-графиком были выполнены следующие работы по созданию систем электропитания, водоохлаждения и термостабилизации, управления и сигнализации первой очереди установки ИРЕН:

- смонтировано и испытано все электрооборудование ускорителя ЛУЭ-200 и вспомогательных систем;

- смонтирована система водоохлаждения, термостабилизации и подготовки дистиллята;

- смонтирована система блокировок и сигнализации;

- проведен ремонт пульта управления и вспомогательных помещений, идет монтаж оборудования системы АСКУ (автоматизированная система контроля и управления);

- начаты работы по изготовлению системы АСРК (автоматизированная система радиационного контроля);

- завершается монтаж системы автоматического пожаротушения и пожарной сигнализации.

2. *Работы по ускорителю ЛУЭ-200.* Несмотря на задержку, вызванную аварией с клистроном SLAC 5045, работы по монтажу систем ускорителя

выполняются в соответствии с откорректированным планом-графиком.

- Запущена на штатном месте система зарядки модулятора пушки.

- Смонтированы на штатном месте и стационарно подключены к сети источники питания фокусирующих магнитов: УМ-10, ВЧ-25 (ИЯФ), Bruker D1, Bruker D2, Bruker Q1.

- Испытаны на реальную нагрузку сильноточные источники питания фокусирующих соленоидов 1-й ускоряющей секции (Bruker D1) и СВЧ-группирователя (Bruker Q1).

- Проведены магнитные измерения и коррекция магнитного поля фокусирующего соленоида. Неод-

нородность поля B_r/B_z в области пучка не хуже, чем $\pm 5 \cdot 10^{-3}$.

- На полномасштабном стенде ускорителя ЛУЭ-200 произведена адаптация системы питания клистрона SLAC 5045 к клистрону TH2129.

- Смонтированы катушки-корректоры первого ускорительного промежутка.

- Установлена первая ускорительная секция.

- Завершен монтаж СВЧ-фидера, проведены вакуумные испытания ускорителя в составе источника электронов, первого ускорительного промежутка и первой ускорительной секции.

- Завершается монтаж магнитного спектрометра.

- Завершается монтаж оборудования системы АСКУ.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Работы по теме велись в следующих основных направлениях:

- создание газовых и сцинтилляционных нейтронных детекторов;

- развитие системы формирования нейтронных пучков и системы окружения образца;

- развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры.

Создание нейтронных детекторов. В соответствии с планом были выполнены работы по оптимизации геометрии и рабочих параметров двухкоординатного ПЧД с размерами чувствительной области 225×225 мм и съемом информации с линий задержки:

- диаметр анодной нити уменьшен с 15 до 10 мкм;

- повышены натяжение и точность монтажа катодных нитей;

- обеспечена параллельность анодных и катодных нитей (разброс менее 2 мкм);

- в 1,5 раза уменьшена длина линии задержки.

Все это позволило улучшить пространственное разрешение до 2 мм по обеим координатам.

Благодаря финансовой поддержке Венгерской академии наук начата разработка и изготовление аналогичного ПЧД-детектора для спектрометра «Горизонт». На этапе 2007 г. разработана конструкторская документация и изготовлен корпус ПЧД, приобретены высоковольтный источник питания, НИМ-крейт и дискриминатор с точной временной привязкой. Изготовлены также предусилители для съема сигналов с анодной и катодных плоскостей детектора.

На период 2007–2008 гг. получен грант Федерального агентства по науке и инновациям Минобр-

науки РФ на разработку и создание системы мониторинга холодных замедлителей нового типа на основе твердой замороженной смеси ароматических углеводородов в виде шариков при температуре 20–30 К (Государственный контракт № 02.518.11.7035 от 19.04.07). В рамках этого контракта разработан проект системы мониторинга, основным элементом которой является двухкоординатный ПЧД с чувствительной областью 200×200 мм. В 2007 г. изготовлены корпус и электроды детектора и приобретены стандартные электронные блоки.

В сотрудничестве ИЯИЭ БАН (София) разрабатывается газонаполненный изогнутый позиционно-чувствительный детектор, предназначенный для исследований в области рентгеноструктурного анализа твердотельных образцов. Чертежи корпуса детектора сданы в производство.

Были проведены работы по модернизации детекторного стенда и создан новый намоточный станок для намотки рамок электродов детекторов с размерами до 800×800 мм.

Системы формирования нейтронных пучков и системы окружения образца. В 2007 г. в рамках проекта ВМВФ–ОИЯИ совместно с институтами ФРГ и ПИЯФ (Гатчина) начаты работы по созданию изогнутых зеркальных нейтронных каналов на канале 7а реактора ИБР-2 и кардинальной модернизации спектрометров «Эпсилон» и СКАТ. Выполнены расчеты и моделирование элементов нейтронного канала, определены входные сечения для нейтронных каналов 7а-1 и 7а-2, разработаны эскизные и рабочие проекты вакуумных кожухов, несущих опор и юстировочных столов, завершен демонтаж старого нейтронного канала и заключены контракты с ПИЯФ на проектирование, разработку и изготовление трехканального зеркаль-

ного коллиматора входной части нейтронного комплекса.

Разработан, изготовлен и налажен блок управления исполнительными механизмами спектрометров. Блок выполнен в стандарте CAN, его основным элементом является программируемый контроллер M167-1. Все спектрометры ИБР-2М будут оснащаться такими унифицированными блоками, каждый из которых может управлять 32 шаговыми моторами [18].

На базе оборудования, полученного по долевному взносу Румынии, создан и запущен в работу вакуумный стенд с гелиевым течеискателем L200 (Leubold), предназначенный для испытаний различных вакуумных и криогенных систем спектрометров ИБР-2. Заключен также контракт с фирмой CRYOMESH (США) на поставку криорефрижератора РТ 403, являющегося основным элементом криогенного стенда.

Разработан шахтный криостат с рефрижератором замкнутого цикла SUMITOMO RP-062B для проведения экспериментов по дифракции с образцами в камерах высокого давления с сапфировыми наковальнями на пучках тепловых нейтронов в диапазоне температур 6–300 К [19]. Документация в настоящее время проходит технологическую обработку в ОП ОИЯИ.

Развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры, разработка программного обеспечения. Завершена разработка блока сбора данных с многосчетчиковых систем (до 64 каналов в одном блоке). Блок подготовлен к испытаниям на нейтронном источнике в ПИЯФ (Гатчина). Изготовлены также блоки DAQ-системы для сбора и накопления данных с 1D и 2D ПЧД. Тестирование этих блоков будет проводиться в начале 2008 г. на реакторе BER-II (ИГМ, Берлин). Ожидаемая скорость счета составит не менее 10^6 событий/с.

Начаты работы по созданию кабельной инфраструктуры сетевого сегмента экспериментальных залов ИБР-2 (Gigabit Ethernet). Заключен контракт с компанией «Контакт» на поставку комплектующих изделий, выполнены работы по прокладке и сварке волоконно-оптического кабеля.

В работах по программному обеспечению основное внимание уделялось развитию комплекса Sonix+ для работы на реакторе ИБР-2М и практической проверке подготовленных программ на реакторах сторонних организаций: ФЭИ (Обнинск) и РНЦ «Курчатовский институт» (Москва). В частности,

— разработаны модули для систем управления исполнительными механизмами с CAN-интерфейсом;

— усовершенствована программа визуализации спектров для работы в on-line и off-line режимах;

— начата разработка программного обеспечения новых электронных блоков DAQ, подключаемых к компьютеру через USB-интерфейс;

— подготовлена к проверке первая версия системы удаленного слежения и управления ходом эксперимента на спектрометрах Web Sonix.

Совместно с ИГМ (Берлин) выполнен большой объем работ по интеграции в программный комплекс CARESS и проверке долговременной стабильности разработанного в ЛНФ программного обеспечения системы сбора данных с двухкоординатных ПЧД. Эти работы успешно завершены на нескольких спектрометрах реактора BER-II и синхротронного источника ИГМ.

В 2007 г. продолжалось развитие программного комплекса VITESS для моделирования новых элементов спектрометров и методов нейтронного рассеяния. Как и ранее, был использован метод Монте-Карло (движение частиц в трехмерном пространстве). Были созданы, протестированы и внедрены следующие модули для пакета VITESS [20, 21]:

— модуль для системы рефракционных линз с комплектом вспомогательных программ (поиск фокуса и т. п.);

— модуль для моделирования прецессии спина нейтрона в импульсных магнитных полях «треугольник», «пила»;

— модуль для анализа поляризации во временных интервалах (Time Gate) для моделирования спектрометра спин-эхо;

— модуль для моделирования многоканальных пропускающих поляризаторов (в стадии тестирования и внедрения).

Были выполнены предварительные расчеты и промоделированы следующие установки:

— спектрометр спин-эхо с временно-зависимыми магнитными полями («треугольник», «пила»);

— системы фокусирующих рефракционных линз и их применение в простейшей малоугловой установке для улучшения качества данных;

— пропускающие поляризаторы нейтронного пучка (вида N, V, Double V).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pomjakushin V. Yu. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 054410-1-12.
2. Kozlenko D. P. et al. // Ibid. P. 064422-1-12.
3. Avdeev M. V. et al. // J. Mag. Mag. Mater. 2007. V. 311. P. 6–9.
4. Aksenov V. L. et al. // Crystallogr. Rep. 2007. V. 52. P. 403–409.
5. Dokukin M. Ye. et al. // Bull. of the Rus. Acad. of Sci. Physics. 2007. V. 71. P. 1643–1644.
6. Kiselev M. A. // Crystallogr. Rep. 2007. V. 52. P. 549–553.
7. Here M. et al. // Chemistry and Physics of Lipids. 2007. V. 147. P. 78–86.

8. Rogachev A. V. *et al.* // Crystallogr. Rep. 2007. V. 52. P. 546–550.
9. Nikitin A. N. *et al.* // Ibid. P. 450–457.
10. Франк А. И. и др. Новый гравитационный эксперимент с ультрахолодными нейтронами // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. С. 255–259.
11. Muzhychka A. Yu. *et al.* Modeling and Testing Background for the Neutron–Neutron Scattering Experiment at the Reactor YAGUAR // Nucl. Phys. A. 2007. V. 789. P. 30–45.
12. Pokotilovski Yu. N., Natkaniec I., Holderna-Natkaniec K. The Experimental and Calculated Density of States and Ultracold Neutron Loss Coefficient of Perfluorinated Oils at Low Temperature // Physica B (in press).
13. Oprea A. I. *et al.* Recent Result in the Study of Asymmetries in Neutron p -Resonances of ^{14}N at Neutron Energies up to 1 MeV // Proc. of the 14 Intern. Seminar on Interaction of Neutron with Nuclei (ISINN-14), Dubna, 2007. P. 170–176.
14. Саламатин И. М., Смирнов В. И., Фурман В. И. Изменение выхода запаздывающих нейтронов при делении ^{237}Np тепловыми нейтронами // ЯФ. 2007. Т. 70, № 6. С. 1–6.
15. Mosulishvili L. M. *et al.* Neutron Activation Analysis for Studying Cr Uptake in the Blue-Green Microalga *Spirulina Platensis* // J. Neutron Res. 2007. V. 15, No. 1. P. 49–57.
16. Machajdík D. *et al.* Thermal Stability of Advanced Gate Stacks Consisting of a Ru Electrode and Hf-Based Gate Dielectrics for CMOS Technology // Vacuum. 2007. V. 81. P. 1379–1384.
17. Kulik M. *et al.* Investigation of indium diffusion process and optical effects in In+ implanted GaAs // Vacuum. 2007. V. 81. P. 1124–1128.
18. Журавлев В. В. и др. Система управления исполнительными механизмами спектрометра на реакторе ИБР-2 как современная локальная сеть контроллеров — САН. Сообщ. ОИЯИ P13-2007-170. Дубна, 2007.
19. Trofimov V. N. *et al.* An Ultrahigh-Vacuum Nitrogen-Free Helium Cryostat with Small Heat Losses // Instr. Exp. Techn. 2007. V. 50, No. 6. P. 838–841.
20. Zsigmond G. *et al.* Monte Carlo Simulations for the Development of Polarized Neutron Instrumentation // Physica B: Condens. Matter. 2007. V. 397, Issues 1–2. P. 115–119.
21. Manoshin S., Ioffe A. New Modules for the VITESS Software Package: Time-Gradient Magnetic Fields and Neutron Refractive Lenses // Nucl. Instr. Meth. B. 2007 (in press).