

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ им. И. М. ФРАНКА

Научная программа Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в 2004 г. включала 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», 06-4-1036-2001/2004, руководители В. И. Фурман и В. Н. Швецов). Для обеспечения физических исследований осуществлялось развитие и создание базовых установок лаборатории ИБР-2 (тема «Развитие и совершенствование комплекса ИБР-2», 07-4-851-87/2007, ру-

ководители В. Д. Ананьев и Е. П. Шабалин) и ИРЕН (тема «Создание установки ИРЕН (проект ИРЕН)», 06-4-0993-94/2004, руководители В. И. Фурман и И. Н. Мешков), а также развитие комплекса спектрометров ИБР-2 (тема «Разработка и создание элементов нейтронных спектрометров для исследования конденсированных сред», 07-4-1052-96/2003, руководители А. В. Белушкин и В. И. Приходько).

Актуальные вопросы исследований, проводимых в кооперации с ведущими ядерными центрами, были рассмотрены на XII Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами, третьем совещании ОИЯИ–Германия пользователей ИБР-2 «Нейтронные исследования конденсированных сред на импульсном реакторе ИБР-2», международном совещании по проекту SAD и семинаре, посвященном 20-летию реактора ИБР-2.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Дифракция. С помощью совместного анализа рентгеновских и нейтронных (полученных на ФДВР) дифракционных данных [1] была определена кристаллическая структура однофазного соединения Li_2BeD_4 . Соединение кристаллизуется в моноклинной сингонии (пространственная группа $P2_1/c$) с параметрами решетки $a = 7,06228(9) \text{ \AA}$, $b = 8,3378(1) \text{ \AA}$, $c = 8,3465(1) \text{ \AA}$, $\beta = 93,577(1)^\circ$, $Z = 8$. Его структура содержит изолированные тетраэдры BeD_4 и атомы Li между ними (рис. 1) и сохраняется без каких-либо заметных изменений вплоть до 8 К. Определение кристаллической структуры Li_2BeD_4 является первым реальным результатом для тройных гидридов в системе Li-Be-H. Оно продемонстрировало мощь современных структурных вычислительных программ для прямого определения структуры из порошковых дифракционных

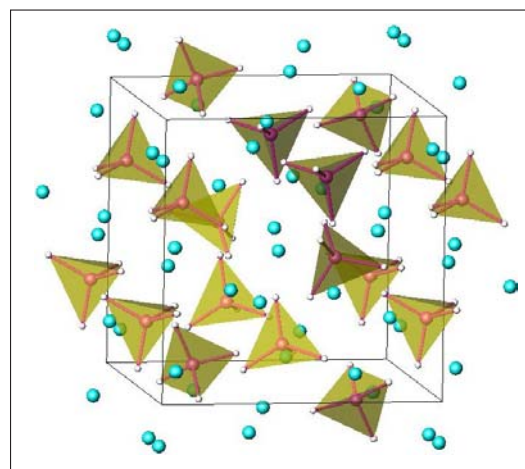


Рис. 1. Кристаллическая структура соединения Li_2BeD_4 , восстановленная по данным нейтронной дифракции

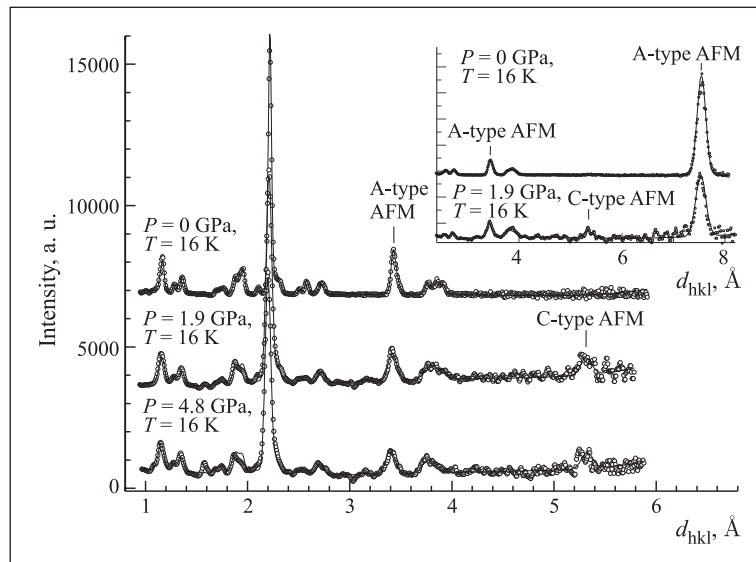


Рис. 2. Участки нейтронных дифракционных спектров $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$, измеренных при высоких давлениях $P = 0; 1,9$ и $4,8 \text{ ГПа}$, $T = 16 \text{ К}$ и обработанных по методу Ритвельда. С повышением давления наблюдалось появление новой АФМ-фазы С-типа

спектров и преимущества одновременного использования нейтронных и рентгеновских данных для получения структурной информации о системах, состоящих из самых легких атомов.

На дифрактометре ДН-12 проведено исследование влияния высокого давления до 5 ГПа и низкой температуры в диапазоне $15\text{--}300 \text{ К}$ на атомную и магнитную структуру манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0,5; 0,56$) [2]. Соединения $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ при нормальном давлении имеют тетрагональную структуру (пр. гр. $I4/mcm$). С понижением температуры в $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$ наблюдается фазовый переход в антиферромагнитную (АФМ) фазу А-типа (рис. 2), который сопровождается структурным фазовым переходом из тетрагональной в орторомбическую структуру (пр. гр. $Fm\bar{m}m$). В $\text{Pr}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ с понижением температуры наблюдаются переходы в промежуточную тетрагональную ФМ-фазу и низкотемпературную орторомбическую АФМ-фазу А-типа. При высоком давлении $P \approx 2 \text{ ГПа}$ в $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$ возникает новая тетрагональная АФМ-фаза С-типа, которая сосуществует с исходной орторомбической фазой А-типа в области низких температур. В $\text{Pr}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ влияние высокого давления приводит к значительному возрастанию температуры фазового перехода из тетрагональной ФМ-фазы в орторомбическую АФМ-фазу А-типа. В области низких температур наблюдается сосуществование исходной орторомбической АФМ-фазы А-типа с тетрагональной фазой, не проявляющей признаков наличия дальнего магнитного порядка.

Научная программа на дифрактометрах «Эпсилон» и СКАТ была сконцентрирована на исследовании внутренних напряжений в поликристалличе-

ских материалах (в основном в горных породах), текстурном анализе геологических материалов и определении анизотропных физических свойств горных пород по кристаллографическим текстуррам. В частности, проведены исследования остаточных напряжений строительных материалов из мрамора, направленные на лучшее понимание процессов, ведущих к деформации конструкций [3].

Впервые методами нейтронной дифрактометрии и акустической эмиссии (АЭ) исследована динамика $\alpha\text{--}\beta$ -перехода в образце природной горной породы — кварците [4]. Измерены изменения межплоскостных расстояний кристаллической решетки в процессе $\alpha\text{--}\beta$ -перехода и на этой основе оценены значения внутренних напряжений, которые в несколько раз превысили приложенное к образцу внешнее механическое напряжение. Установлено, что после завершения $\alpha\text{--}\beta$ -перехода возникали всплески АЭ, превышающие на два порядка по интенсивности уровень АЭ, обусловленный термическим растрескиванием при нагревании образца. Возникновение всплесков упругих колебаний АЭ при фазовом переходе в породообразующем минерале земной коры — кварце — свидетельствует о дискретном характере неустойчивости. Не исключено, что такие явления могут способствовать развитию очага землетрясения за счет изменения напряженного состояния среды или триггерного эффекта.

Неупругое рассеяние. На спектрометре неупругого рассеяния ДИН-2ПИ проведено сравнение экспериментальных данных по системе натрий–свинец с расчетом на основе моделирования методами молекулярной динамики [5]. Сделан вывод о том, что при низких концентрациях примеси $C_{\text{Pb}} \sim 10\% \text{ ат.}$ и менее кластеры типа Na_4Pb в заметном количестве

отсутствуют и растворенный свинец присутствует в расплаве в атомарном состоянии. Такой вывод позволяет более осознанно подходить к оценкам термодинамических и физико-химических свойств этого расплава.

На спектрометре НЕРА-ПП выполнены эксперименты и проведено моделирование функции плотности колебательных состояний в твердом метаноле, различным образом дейтерированном: CH_3OH , CH_3OD , CD_3OH , CD_3OD . Показано, что метанол может эффективно использоваться как стандарт для оценки качества компьютерной симуляции динамики молекул в кристаллической и аморфных фазах [6].

Рефлектометрия поляризованных нейтронов.

На рефлектометре с поляризованными нейтронами РЕМУР исследовалось явление сверхпроводимости и магнетизма на границе раздела сверхпроводника с ферромагнетиком [7]. В частности, были исследованы слоистые структуры, в которых одновременно существуют составленные из сверхпроводящих слоев ванадия и ферромагнитных слоев железа периодические структуры Fe/V плюс бислои V/Fe и $\text{V}/\text{Fe}_{0,66}\text{V}_{0,34}$. Показано, что эффекты влияния сверхпроводимости на магнетизм сильно зависят от состава и структуры магнитного слоя.

Малоугловое рассеяние нейтронов. На установке малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО проведены исследования ряда полимерных систем, дендримеров, а также смешанных растворов полимеров и поверхностно-активных веществ. При изучении структуры поликарбосилоновых дендримеров с различным молекулярным строением были выявлены структурные особенности укладки концевых групп дендримеров, а именно их слоистый характер. Это, по-видимому, является причиной ограничения роста дендримеров при увеличении степени генерации [8].

Проведены эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов с вариацией контраста на высокостабильных магнитных жидкостях с водной основой. Получены параметры коллоидных частиц жидкостей при различных концентрациях диспергированного магнитного вещества (магнетит). Проведено сравнение структуры данных жидкостей с менее стабильными водными образцами, использующими другие ПАВ для стабилизации, а также с высокостабильными магнитными жидкостями на основе неполярных носителей, таких как бензол [9].

Исследована коагуляция водных дисперсий фуллеренов [10] при добавлении в них различных солей. При этом анализировалась временная эволюция спектров поглощения видимого и ультрафиолетового излучения. Обнаружено, что концентрация фуллеренов в растворах монотонно уменьшается после добавления соли, что подтверждает зарядовую природу стабилизации коллоидных частиц в данных системах. Измеренные пороги коагуляции значительно отличаются от полученных ранее. Проведены эксперименты и предварительная обработка данных по ма-

лоугловому рассеянию нейтронов на коагулирующих водных растворах фуллеренов в режиме реального времени. Получены оценки динамики роста кластеров фуллеренов и их концентрации в растворе при коагуляции.

Методом нейтронной дифракции проведены исследования структуры модельных мембран Stratum Corneum [11]. Исследована структура смешанной четырехкомпонентной системы керамид б/холестерин/пальмитиловая кислота/сульфат холестерина с различными весовыми соотношениями компонентов и низким уровнем гидратации. Определено положение холестерина в липидном бислое. Измерена функция распределения воды в бислое. Доказано, что модельные мембраны Stratum Corneum имеют малую гидратацию межмембранного пространства по сравнению с фосфолипидами.

Главные методические результаты. Проведена модернизация рефлектометра РЕМУР на импульсном реакторе ИБР-2. В результате в несколько раз снизился радиационный фон на спектрометре, а также повысилась интенсивность пучка нейтронов, прошедшего многоканальный поляризатор. В спектрометре реализована конструкция из двух зеркал-поляризаторов, что позволило значительно увеличить поляризацию пучка нейтронов. Разработано новое программное обеспечение спектрометра, основанное на использовании VME-PSI-адаптера, что повысило надежность работы.

Проведена модернизация рефлектометра «Рефлекс». Тестовые измерения на установке в сентябре–октябре 2004 г. показали, что в результате переноса механического прерывателя рабочая часть спектра тепловых нейтронов увеличилась с $\Delta\lambda = 5 \text{ \AA}$ до 10 \AA , что значительно расширило диапазон регистрируемых значений переданного импульса рассеянных нейтронов.

На спектрометре ДИН-2ПИ в соответствии с планом завершено проектирование нового корпуса термостата TS-3000М. Разработаны рабочие чертежи для изготовления модернизированного варианта обечайки корпуса термостата. Реконструирован блок радиационных экранов. Использование новых материалов, в частности более технологичных (по сравнению с чистым вольфрамом) вольфрам-рениевых сплавов, позволило создать конструкцию блока, более удобную при варьировании количества экранов, их материала и толщины в зависимости от параметров эксперимента.

На рефлектометре РЕМУР разработан алгоритм применения различных теоретических подходов для расчета диффузного рассеяния в эксперименте по рефлектометрии нейтронов. Созданы пакеты компьютерных программ для модельных расчетов и фитирования экспериментальных данных рассеяния нейтронов от магнитных многослойных наноструктур. Выполненная работа позволяет проводить более корректную обработку экспериментальных данных по

рассеянию поляризованных нейтронов от магнитных многослойных наноструктур и исследовать эффекты близости на масштабах $1 \div 10^4$ нм.

В группе биофизических исследований на основе гидрофобно-гидрофильной модели бислоя с линейной функцией распределения воды и модели раз-

деленных формфакторов разработано программное обеспечение для описания внутренней структуры мембраны липидных везикул по спектрам малоуглового рассеяния нейтронов и проведены исследования нескольких липидных систем методом малоуглового рассеяния нейтронов.

НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Экспериментальные исследования. В 2004 г. экспериментальная программа в области нейтронной ядерной физики в ЛНФ включала традиционные направления как фундаментальных, так и прикладных исследований, проводившихся на пучках ИБР-2 и ЭГ-5, а также в сотрудничестве с другими ядерными центрами России, Болгарии, Польши, Чехии, Германии, Республики Корея, Франции, США и Японии.

В течение года был завершен анализ результатов проведенных в 2002–2003 гг. экспериментов по поиску отрицательного нейтронного p -резонанса у изотопов свинца [12]. С целью дополнительной проверки полученных результатов подготовлена реконструкция гамма-спектрометра СОСОС с целью увеличения его эффективности и быстродействия.

Для развития работ по получению данных о выходах и постоянных распада групп запаздывающих нейтронов в делении минорных актинидов проведена модернизация установки «Изомер» на ИБР-2. Проведены первые измерения на модернизированной установке с U-235. Сконструирована камера деления, позволяющая проводить измерения запаздывающих нейтронов для ^{245}Cm .

На установке ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ начаты эксперименты по измерению энергетической зависимости коэффициентов углового распределения в реакции $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ в диапазоне энергии нейтронов ~ 10 кэВ – 1 МэВ [13]. Исследования интерференционных эффектов s - и p -резонансов в реакции (n, p) представляют интерес как для получения более полной спектроскопической информации о p -резонансах, так и для точной интерпретации результатов измерений P -нечетных эффектов. Данные по угловым распределениям для такого спектра важны также для выяснения причин сильного расхождения (в 2–3 раза) значений среднего по максвелловскому распределению сечения при звездной температуре, полученного в ряде работ. Вычислено значение корреляции «вперед-назад» $\alpha_{\text{fb}} = (4,2 \pm 4,0) \cdot 10^{-2}$ без учета вклада фона.

Завершены последние измерения по программе коллаборации $n\text{TOF}$ — изучение природы вибрационных резонансов в делении, индуцированном нейтронами, и получение сечений деления для реше-

ния проблем ADS-систем и сжигания ядерных отходов. С использованием детектора FIC1 измерены сечения деления на нейтронах изотопов ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{245}Cm с рекордным энергетическим разрешением в диапазоне энергий нейтронов от 0,01 эВ до 200 МэВ. Кроме того, благодаря новой ионизационной камере одновременно измерялась асимметрия «вперед-назад» для фрагментов из реакции $^{236}\text{U}(n, f)$ вблизи делительного порога. Это была первая попытка исследований интерференционных эффектов в вибрационных резонансах.

На пучке PF1 реактора ILL (Гренобль) был проведен эксперимент по исследованию массово-энергетических корреляций в тройном делении ^{235}U [14], вызванном нейтронами. Осколки деления измерялись с помощью быстрой двойной ионизационной камеры, а для регистрации легких заряженных частиц использовались $\Delta E-E$ -телескопы высокого разрешения, позволяющие идентифицировать частицы по заряду и массе от изотопов углерода до бериллия, а также измерять их энергии и угловые распределения. Получены предварительные результаты по выходам, энергетическим и угловым распределениям легких заряженных частиц, исследованы некоторые свойства четверного деления с одновременным вылетом двух α -частиц или α -частицы и трития.

В рамках программы подготовки экспериментов с оптически поляризуемой газообразной мишенью по проверке возможного нарушения временной инвариантности (в сотрудничестве с КЕК, Япония) была модифицирована установка для измерения поляризации ^3He методом пропускания нейтронов. Модификация была предпринята с целью измерения псевдомагнетизма поляризованных ядер ^{129}Xe и ^{131}Xe . Псевдомагнитное взаимодействие поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами Хе должно приводить к вращению плоскости поляризации пучка. В этом случае экспериментальный эффект должен проявиться в виде разности отсчетов детектора для измерений с поляризованным и неполяризованным Хе. На практике предполагается измерять разность трансмиссий поляризованного нейтронного пучка в области 0,02–0,1 эВ.

Продолжались работы по дальнейшему развитию методики измерения T -неинвариантных эффектов в нейтрон-ядерных взаимодействиях: трехвекторной P -нечетной T -нечетной и пятивекторной P -четной T -нечетной корреляций векторов I , k , s . Проведены нейтронографические исследования структуры монокристаллического образца LaAlO_3 , которые показали его пригодность для проведения пробных экспериментов по динамической поляризации ядер ^{139}La для изучения первого типа корреляций. Для исследования второго типа корреляций проведены оценки величины выстроенности ядер ^{127}I в монокристалле йода при низких температурах. Выяснено, что пригодная для измерений выстроенность $\sim 50\%$ может быть получена при охлаждении монокристалла йода до температуры $\sim 20\text{--}50$ мК. Для проверки идеи динамического выстраивания ядер был приготовлен (совместно с ИТЭФ) монокристалл ниобата лютеция с парамагнитной примесью, проведены измерения ЭПР-спектров этого кристалла, проведен пробный сеанс динамического выстраивания, который показал необходимость создания более чувствительного широкодиапазонного Q-метра, не разрушающего выстроенность.

Разработанный в 2003 г. и опубликованный в сообщениях ОИЯИ ЕЗ-2003-183 и РЗ-2003-232 новый метод определения длины ne -рассеяния b_{ne} был применен для обработки литературных данных по структурному фактору $S(q)$ газообразного криптона при разных давлениях. В результате было получено новое значение $b_{ne} = -(1,53 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ Фм.

В плане подготовки эксперимента по прямому измерению длины nn -рассеяния на импульсном реакторе ЯГУАР (Снежинск) были проведены измерения потока быстрых, эпитепловых и тепловых нейтронов по всей глубине (~ 12 м) подреакторной шахты, которые удовлетворительно совпали с расчетными значениями этих величин, что оправдывает дальнейшее развитие работ по осуществлению эксперимента по нейтрон-нейтронному рассеянию [15]. Проведены расчеты эффекта и фона для эксперимента по nn -рассеянию, которые хорошо совпали с результатами расчетов, проведенных независимо в ВНИИТФ (Снежинск). В ЛНФ ОИЯИ изготовлен и перевезен в Снежинск вакуумный надреакторный канал.

На реакторе LL (Гренобль) выполнен эксперимент по хранению УХН, в результате которого было показано существование канала аномальной утечки УХН в широком интервале температур (70–800 К) из сосудов с совершенными стенками, выполненными из монокристаллического сапфира.

Выполнен новый эксперимент по временной фокусировке УХН. Достигнута эффективность фокусировки $\sim 25\%$ при теоретически возможном значении для используемого типа дифракционной решетки 40%. Дефицит эффективности объясняется недостаточным качеством решетки. Проведено детальное измерение спектров УХН при дифрак-

ции на движущейся решетке. Результаты позволяют осуществить количественное сравнение с теорией и находятся в хорошем согласии с расчетом. На основе этих измерений сделана оценка поперечной длины когерентности волновой функции свободного нейтрона. Опробована методика времени пролета. Достигнуто временное разрешение $\Delta t/t \approx 3\%$. Ведется подготовка к эксперименту по наблюдению изменения энергии нейтрона при прохождении через ускоренное вещество. Существование эффекта следует из справедливости принципа эквивалентности и детальных нейтронно-оптических расчетов. Предложен эксперимент по прецизионному измерению ускорения свободного падения нейтрона. Цель эксперимента — проверка принципа эквивалентности для нейтрона.

Решена задача полностью безмодельного определения плотности уровней в фиксированном интервале их спинов и приведенной вероятности возбуждающих и разряжающих их дипольных электрических и магнитных гамма-переходов в диапазоне возбуждения, близком к энергии связи нейтрона [16]. Аналогичных экспериментальных данных в мире не существует. Реализованная для этого методика использует экспериментальные данные по каскадной заселяемости возбуждаемых при захвате тепловых нейтронов уровней до энергии не менее 3–5 МэВ и интенсивности ранее измеренных двухквантовых каскадов на низколежащие уровни тех же ядер. Сопоставление этих данных позволяет экспериментально оценить степень различия энергетических зависимостей радиационных силовых функций первичных и вторичных переходов каскадного гамма-распада компаунд-состояния и с учетом этого различия определить без использования каких-либо дополнительных гипотез интервал вероятных значений плотности уровней с минимально возможной в настоящее время систематической погрешностью. Такие данные получены для 19 ядер из области $39 < A < 201$. Основной физический вывод, следующий из их анализа: в большинстве ядер очень существенное изменение структуры возбужденных уровней наблюдается в районах $\sim 20, 50$ и 80% энергии связи нейтрона. В рамках существующих моделей плотности уровней наблюдаемый эффект можно связать только с разрывом двух, как минимум, куперовских пар нуклонов.

В области теоретической физики проведено теоретическое исследование парных корреляций нейтронов с малыми относительными импульсами, образующихся в процессе деления атомных ядер. В частности, показано, что корреляционный метод в принципе может быть использован для определения доли пар мгновенных («pre-scission» и «scission») нейтронов в общем количестве нейтронных пар, фиксируемом при делении (так как реально для обычных нейтронов деления парные корреляции отсутствуют).

Прикладные исследования. В 2004 г. продолжались работы по изучению атмосферных выпадений тяжелых металлов с применением техники биомониторинга, НАА и ГИС-технологий (проект РЕГАТА) на территории Центральной России (в Тульской, Тверской, Ярославской областях и на юго-востоке Московской области) [17], а также в Армении (Севан) и Вьетнаме. Проведены организационные и методические работы по подготовке к очередному европейскому одновременному сбору мхов — биомониторов (moss-survey) атмосферных выпадений тяжелых металлов в 2005 г. в ряде стран-участниц и неучастниц ОИЯИ (Белоруссия, Украина, Болгария, Босния, Македония, Польша, Румыния, Сербия, Словакия, Турция (европейская часть)).

Проведен сравнительный анализ различных биомониторов (лишайников, коры деревьев) и почвы из района нефтеперерабатывающего завода в Констанце (Румыния). Показана возможность использования биомониторов для оценки воздействия этого предприятия на окружающую среду курортной зоны Черноморского побережья Румынии.

Проведен НАА более чем 250 образцов растительного и животного происхождения в рамках координационной программы (2002–2005 гг.) и проекта технической кооперации с МАГАТЭ (2003–2005 гг.) по контролю и качеству продуктов питания, выра-

шенных в условиях сильного антропогенного загрязнения.

В 2004 г. выполнен заключительный этап работ по проекту «Мониторинг на рабочих местах и здоровье персонала, занятого в производстве фосфорных удобрений на ряде заводов России, Узбекистана, Польши и Румынии» (Европейская программа 5, Коперникус). Результаты анализа экологических образцов (сырья, почвы, донных отложений, воды и воздушных фильтров) и биосубстратов человека (волосы, ногти, моча и зубы) доложены на двух международных конференциях и направлены в печать.

Продолжены совместные работы с группой биофизиков Института физики АН Грузии по разработке новых медицинских препаратов и сорбентов на основе сине-зеленой водоросли *Spirulina platensis*. Часть этих исследований была проведена на реакторе Университета в Техасе, США. В 2004 г. получен патент на способ получения биомассы спирулины, содержащей хром.

Завершен анализ данных по изучению влияния нейтронов спектра деления на физические свойства мелкокристаллических алмазов, полученных в Институте физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (Минск).

НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Импульсный реактор ИБР-2. В 2004 г. реактор ИБР-2 работал в соответствии с утвержденным графиком. На физический эксперимент отработано около 1400 ч в четырех циклах. Распределение времени на эксперименты на спектрометрах реактора производилось в соответствии с рекомендациями экспертов по поступившим заявкам и с имеющимися долгосрочными обязательствами. Основные результаты по модернизации ИБР-2 в 2004 г.:

- Подвижный отражатель (ПО-3) — главная задача года. В начале февраля 2004 г. полностью завершена сборка ПО-3 на стенде ЛНФ и осуществлен пуск на номинальных оборотах. Выполнена программа исследований ПО-3 в режимах 5 и 10 Гц по измерению вибрационных характеристик. Все параметры ПО-3 соответствуют техническим требованиям. Также проведены ресурсные испытания, которые не выявили каких-либо отклонений в работе

ПО-3, все системы работали штатно. Далее машина была перевезена в здание реактора.

Выполнен монтаж ПО-3 на штатном месте около реактора, проведены испытания; ПО-3 принят в эксплуатацию ГАН.

С 16 июня по 23 июля 2004 г. выполнена программа пуска и исследования основных характеристик ИБР-2 с новым ПО-3: измерена кривая эффективности подвижного отражателя в стационарном режиме, измерены эффективности блоков регулирования, определен оперативный запас реактивности, произведена догрузка реактора одной ТВС, измерены форма импульса и флуктуации импульсов до 1,5 МВт. Полученные результаты близки к расчетным. Таким образом, завершен очень важный этап модернизации ИБР-2 по созданию нового ПО-3.

С 13 сентября 2004 г. началась плановая работа на физический эксперимент в соответствии с графиком.

- На ПО «Маяк» завершено изготовление твэлов. В апреле 2004 г. твэлы были доставлены в ОИЯИ. Ведутся работы по подготовке участка для сборки твэлов в ТВС.

- Завершены работы по выпуску конструкторской документации на стационарные отражатели и откатные защиты.

- Продолжалось изготовление в НИКИЭТ нового корпуса реактора, развернуто изготовление откатных защит и стационарных отражателей в ОП ОИЯИ.

- Продолжалась разработка конструкторской документации (КД) по СУЗ ИБР-2.

- Начата разработка КД по комплексу замедлителей для реактора ИБР-2М, продолжалось изготовление ХГУ.

На обеспечение работ по модернизации ИБР-2 в 2004 г. было израсходовано на 01.12.2004 г. 626 тыс. долл., в т.ч. ОИЯИ — 278 тыс. долл., Федеральное агентство по атомной энергии — 348 тыс. долл. США.

Проект ИРЕН. План работ по проекту ИРЕН на 2004 г. содержал следующие основные задачи:

- 1) завершение демонтажа реактора ИБР-30;
- 2) доставка топлива размножающей мишени из ПО «Маяк» в ОИЯИ;
- 3) монтаж основного оборудования ускорителя ЛУЭ-200 в зд. 43.

Объем минимального финансирования для реализации этого плана составлял 250 тыс. долл. США. Реально в марте 2004 г. было выделено около половины необходимой суммы с гарантиями оплаты только первых двух задач. К тому же значительные средства (около 50 тыс. долл. США) необходимо было затратить для выплаты долга НИКИЭТ за выполненную в течение 2002–2003 гг. работу по подготовке конструкторской документации для изготовления размножающей мишени ИРЕН.

До середины августа план-график работ по демонтажу реактора ИБР-30 выполнялся с небольшими задержками, несмотря на очень трудную ситуацию с наполнением бюджета ОИЯИ. Но 19 августа 2004 г. вступило в действие постановление Правительства РФ о реорганизации Госатомнадзора и Министерства экологии, что привело к приостановке рассмотрения заявок на лицензирование деятельности в области использования атомной энергии. Это вызвало существенную задержку в получении лицензии на ввод в эксплуатацию здания 117/6 — хранилища активированных элементов конструкции реактора ИБР-30 и фактически исключило возможность завершения работ по демонтажу реактора в 2004 г., как это было запланировано.

Переговоры с представителями реорганизуемого Ростехнадзора, включающего в качестве управления прежний Госатомнадзор, показывают, что необходимые лицензии могут быть получены в первом квартале 2005 г., и соответственно работы по демонтажу реактора смогут проводиться в течение лета 2005 г.

Важно отметить, что все работы из плана-графика 2004 г., которые должны были выполняться службами ЛНФ, успешно завершены.

Большой объем работ был выполнен по подготовке к транспортировке топлива для размножающей мишени ИРЕН. К настоящему времени подготовка к транспортировке топлива из ПО «Маяк» полностью завершена. Топливо должно быть доставлено в ОИЯИ до конца 2004 г.

В связи с практическим отсутствием финансирования работ по монтажу оборудования ускорителя ЛУЭ-200 эти работы велись в основном за счет внутренних резервов. Однако определенный прогресс был достигнут в создании электронного источника, элементов фокусирующей и ВЧ-систем. Импульсная электронная пушка была доведена до проектных параметров, что было подтверждено ее успешным испытанием. Основное оборудование ВЧ-модулятора было установлено на штатном месте в ускорительном зале зд. 43 ЛНФ. На полномасштабном ВЧ-стенде была успешно испытана система удвоения мощности питания клистрона. Однако отсутствие средств на приобретение необходимых кабелей и ряда комплектующих привело к задержке запланированного завершения монтажа основного оборудования ускорителя ЛУЭ-200.

Изготовление элементов магнитной фокусирующей системы в ЛФЧ и ЛВЭ было остановлено в сентябре 2004 г. из-за отсутствия финансирования. Изготовлено ~ 70 % всей фокусирующей системы. Испытание ее элементов на недавно созданном магнитометрическом стенде ЛФЧ показало высокое качество изготовления катушек соленоида и квадрупольных линз.

Учитывая рекомендации 21-й сессии ППК по ядерной физике, руководство проекта ИРЕН предложило продлить тему 06-4-0993-94/2004 на один год с первым приоритетом. Главными задачами, которые должны быть выполнены в течение 2005 г., являются:

- завершение демонтажа реактора ИБР-30 и получение лицензии на строительство установки ИРЕН;
- получение из НИКИЭТ конструкторской документации размножающей мишени и выбор ее изготовителей с целью реальной оценки стоимости завершения проекта ИРЕН;
- рабочее проектирование вспомогательных систем ИРЕН в объеме, необходимом для монтажа оборудования ускорителя ЛУЭ-200;
- завершение монтажа оборудования ЛУЭ-200 в зд. 43 ЛНФ.

Реализация этого плана требует средств, не превышающих среднее ежегодное финансирование проекта ИРЕН и полный бюджет темы 06-4-0993-94/2005. Выполнение сформулированных задач может рассматриваться как основа для принятия стратегических решений о будущем проекта ИРЕН.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Работы по теме в 2004 г. проводились по следующим основным направлениям:

- создание нейтронных детекторов;
- развитие систем окружения образца;
- развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры.

Создание нейтронных детекторов. Инфраструктура. Для обеспечения необходимых условий при изготовлении и тестировании различных типов позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД) была создана и введена в эксплуатацию «чистая комната». Она состоит из трех частей: тамбура, собственно чистой комнаты и чистого бокса внутри нее. В настоящее время чистота воздуха в чистой комнате превышает класс 7 согласно стандарту ISO 14644-1, что достаточно для сборки газовых MWPC-детекторов. Для сборки микростриповых детекторов будет использоваться ламинарный бокс (доставлен в Дубну в октябре 2004 г. и сейчас находится в монтаже).

Создан газовый стенд, позволяющий производить откачку газа из камер детекторов и заполнять их различными смесями газов, в том числе и под давлением. Газовый стенд вместе с другим технологическим оборудованием смонтирован в тамбуре чистой комнаты.

Совместно со специалистами ИФМ РАН (Нижний Новгород) значительно улучшена система намотки нитей в многопроволочных пропорциональных камерах. Это достигнуто за счет применения спейсеров из монокристаллов кремния, в которых с высокой точностью (несколько мкм) протравлены канавки для укладки нитей. Новая система будет использоваться для изготовления анодных и катодных плоскостей ПЧД монитора и однокоординатных детекторов.

Микростриповый нейтронный детектор с «виртуальным» катодом. В сотрудничестве с детекторной группой ILL (Гренобль) был создан микростриповый газовый детектор (MSGC), использующий технологию «виртуального» катода. Рисунки микростриповых структур были предоставлены нам ILL, подложки были изготовлены в ИФМ РАН и затем успешно испытаны в ILL. Оригинальный корпус детектора был разработан и изготовлен в ЛНФ.

Первые результаты тестирования детектора с источником ^{252}Cf показаны на рис. 3, 4. На рис. 3 приведен результат равномерного облучения детектора по одной координате. На рис. 4 показан результат облучения детектора с коллимационной маской, изготовленной из борированного полиэтилена (толщина маски 5 см, в ней вырезаны две щели по 5 мм, расположенные на расстоянии 10 мм). Геометрические размеры изображения щелей на плоскости детектора

составляли 10 мм. Газовая смесь (1 бар) состояла из ^3He (0,5 бар) и CF_4 (0,5 бар), так что координатное разрешение было только 5 мм. При рабочем давлении 2 бар CF_4 ожидается улучшение разрешения до 1,5 мм.

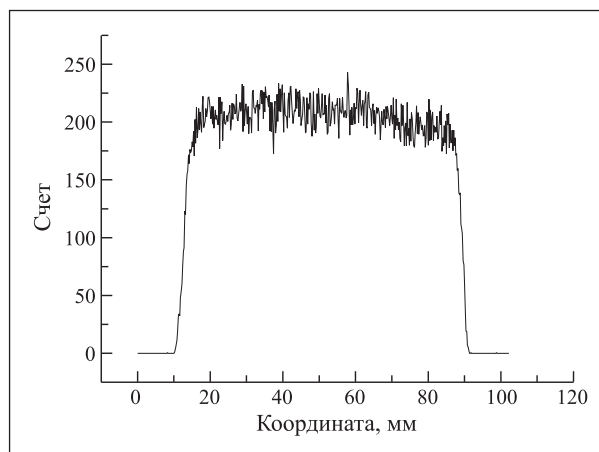


Рис. 3. Равномерное распределение по одной координате

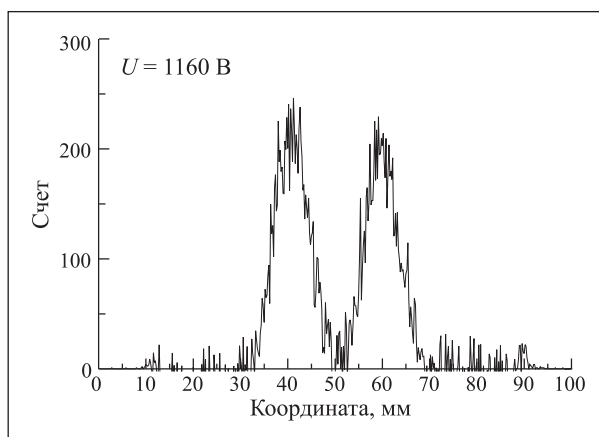


Рис. 4. Изображение двух щелей в коллимационной маске по одной координате

Прототип однокоординатного позиционно-чувствительного детектора для дифрактометра ФСД. Разработан проект однокоординатного широкоапертурного ПЧД, его параметры приведены в табл. 1.

В настоящее время завершается изготовление корпуса детектора в Опытном производстве ОИЯИ. Сборка и тестирование на пучке ИБР-2 планируются в начале 2005 г. Аналогичный детектор будет изготовлен также для Института физики материалов УО РАН (Екатеринбург) по действующему контракту.

Таблица 1

Апертура, мм	200 × 80
Позиционное разрешение (FWHM), мм (центр)	$\Delta x = 1,5$
Эффективность (1 Å), %	40–45
Скорость счета R , кГц	до 100
Метод считывания	Линия задержки
Газовая смесь	${}^3\text{He} + 0,25 \text{CF}_4$ (6 атм)

Позиционно-чувствительный мониторный детектор. В рамках коллаборации ЛНФ и Технического университета (Мюнхен) разработан технический проект и детальная спецификация двухкоординатного позиционно-чувствительного монитора нейтронного пучка [18, 19]. Монитор планируется установить на изогнутом нейтроноводе вне реакторного зала реактора FRM-II. Детектор будет представлять собой многопроволочную пропорциональную камеру с газовой смесью на основе ${}^3\text{He}$. Основные характеристики детектора даны в табл. 2.

Таблица 2

Чувствительная область, мм	100 × 100
Позиционное разрешение (FWHM), мм	$\Delta x \approx 4$ $\Delta y \approx 4$
Чувствительность к тепловым нейтронам S_{th}	$10^{-3} - 10^{-6}$
Диапазон длин волн λ , Å	0,4–12
Скорость счета R , кГц	1–50
Метод считывания	Линия задержки

В настоящее время в ОП ОИЯИ завершается изготовление основных узлов детектора. Тестовые испытания на пучке ИБР-2, а затем на реакторе FRM-II планируются в первой половине 2005 г.

Для спектрометра ФСД разработаны и изготовлены 16 дополнительных модулей 90°-го сцинтилляционного детектора с временной фокусировкой АСТРА [18]. Изготовлены узлы детекторной электроники и механические узлы фиксации детекторных модулей. В настоящее время проводятся сборка и испытания детекторов.

Проведены расчеты по методу фокусирующих поверхностей геометрии чувствительных слоев детектора для регистрации нейтронов на углах рассеяния 90 и 45°. Для спектрометра ДН-6 предполагается изготавливать детектор, состоящий из двух колец. Каждое кольцо составлено из 16 независимых модулей. Разработаны конструкции отдельных модулей детектора для обоих колец. Разработана конструкция поддержки модулей детектора. Проект находится в стадии согласования с экспериментаторами.

Развитие систем окружения образца. Разработана система регулирования температуры на базе контроллера Eurotherm 902 для комплекса оборудования спектрометра «Эпсилон».

Для юстировки монохроматора (Si-монокристалл с изгибатель, изготовленный в ИЯФ (г.Ржев, ЧР)

для спектрометра ДСД реактора ИВВ-2М Свердловского филиала НИКИЭТ) создано гониометрическое устройство, имеющее пять степеней свободы (два качания и два линейных перемещения во взаимно-перпендикулярных направлениях и вращение вокруг вертикальной оси).

Для спектрометра ДСД изготовлена также система управления механическими устройствами, которая реализована в стандарте КАМАК с микроконтроллерным блоком управления шаговыми двигателями SMC на базе микропроцессора 80C167, подключенного к персональному компьютеру по последовательной линии связи. В качестве силового привода четырехфазных шаговых двигателей (общее количество 18) используются четырехканальные коммутаторы-усилители SMD-2A. Система может быть расширена путем подключения к контроллеру SMC дополнительных блоков SMD-2A.

В состав системы управления исполнительными механизмами спектрометра СПН добавлено перемещение платформы нейтроновода, управление двухкоординатной диафрагмой, а также управление поворотными исполнительными механизмами.

Для регулируемой диафрагмы рассеянного пучка нейтронов спектрометра ФДВР изготовлено юстировочное устройство, имеющее три степени свободы. Управление осуществляется через систему контроля гониометра «Huber».

На спектрометре «Изомер» введена в эксплуатацию система управления прерывателем на базе микроконтроллерного блока управления СС-11. Точность стабилизации фазы составила 25–30 мкс. При выходе фазы из заданного диапазона измерения приостанавливаются путем блокировки стартов реактора в системе накопления спектрометрической информации КОМА.

Разработана конструкторская документация на криостат с рефрижератором на импульсных трубках РТ405 (Cryomech, США) для работы в диапазоне температур 250–3 К. В настоящее время детали криостата изготавливаются в экспериментальных мастерских ЛНФ. Криостат с рефрижератором на импульсных трубках изготавливается впервые в России.

Разработан микрорефрижератор с сорбционной откачкой для получения температур до 0,3 К. Микрорефрижератор устанавливается на платформу, имеющую температуру 4,2 К, которая может быть получена в обыкновенном гелиевом криостате или при помощи подходящего рефрижератора замкнутого цикла. В нашем исполнении микрорефрижератор устанавливался на дно гелиевого оптического криостата. Данная работа выполнена в сотрудничестве с Институтом радиоэлектроники РАН (Москва) и Институтом прикладной физики РАН (Нижний Новгород).

Развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры. В рамках работ по интеграции РС в системы сбора данных в 2004 г. за-

вершено создание нового унифицированного программного комплекса Sonix+ для управления оборудованием спектрометров и экспериментом [20–22]. Платформа VME/OS-9 заменена на платформу PC/Windows, и Python был использован как язык описаний. Существующая VME-электроника подключается к PC через VME-PCI-адаптеры. Благодаря структурным изменениям комплекс Sonix+ стал более мощным, гибким и простым в применении и в то же время более универсальным и легко расширяемым. Переход на платформу PC/Windows уменьшает общую начальную стоимость систем автоматизации спектрометров и, что особенно важно, существенно снижает затраты на модернизацию и развитие этих систем в будущем.

В настоящее время Sonix+ успешно эксплуатируется на спектрометре НЕРА-ПП. Расширенные версии Sonix+ для спектрометров РЕМУР и ЮМО находятся в завершающей стадии тестирования.

Программное обеспечение (FPGA-, DSP- и PC-компоненты) платы сбора данных для MWPC-детекторов с линиями задержки [23] было переработано и оптимизировано с целью повышения надежности и увеличения скорости накопления данных до 10^6 соб./с.

Проведен анализ технических решений DAQ-электроники для MSGC-детектора с индивидуальным считыванием информации с каждого стрипа. В результате решено приобрести комплект DAQ-электроники, разработанной в ILL и производящейся фирмой «Synergieconcept» (Гренобль). USB-интерфейс для этой электроники будет разработан в ЛНФ.

В сегменте LAN экспериментальных залов ИБР-2 установлены два новых сетевых коммутатора Catalyst 2950C-24 вместе с источниками бесперебойного питания. Модернизация системы электропитания электроники и компьютеров выполнена также на спектрометрах ЮМО и ФСД.

Начата разработка новых электронных блоков с USB-интерфейсом для накопления данных от точечных детекторов и многопроволочных ПЧД с индивидуальным считыванием информации с каждой нити.

Разработан ряд блоков детекторной электроники, в течение года они были изготовлены, протестированы и установлены на спектрометрах ИБР-2.

В 2004 г. была полностью обеспечена подготовка оборудования спектрометров к четырем циклам работы реактора, а также электронная и компьютерная поддержка экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bulychev V. M. et al. // Inorg. Chem. 2004. V. 43(20). P. 6371–6376.
2. Kozlenko D. P. et al. // J. Phys.: Condensed Matter. 2004. V. 16. P. 2381–2394.

3. Scheffzük Ch., Siegesmund S., Koch A. Strain Investigations on Calcite Marbles Using Neutron Time-of-Flight Diffraction. Stone Decay Hazards. Environ. Geol. 2004. V. 46 (3–4). P. 468–476.
4. Соболев Г. А. и др. // Физика Земли. 2004. Т. 10. С. 5–15.
5. Blagoveshchenskii N. M. et al. Structure of Liquid Na–Pb Alloys: Neutron-Diffraction Investigation // Proc. of XII Intern. Conf. on Liquid and Amorphous Metals. Metz, France, July 11–16, 2004. P. B020.
6. Natkanić I. et al. Neutron Spectroscopy of Deuterated Derivatives and DFT Modelling Vibrational Spectra of Methanol Clusters // Proc. of Workshop on Neutrons and Numerical Methods 2. ILL, Grenoble, Sept. 14–18, 2004.
7. Aksenov V. L. et al. // Physica B. 2005. V. 35. P. 9–13.
8. Озерин А. Н. и др. // Тр. РАН. 2004. Т. 395/2. С. 59–62.
9. Balasoiu M. et al. // Magneto-hydro-dynamics (in press).
10. Avdeev M. V. et al. // Langmuir. 2004. V. 20. P. 4363–4368.
11. Kiselev M. A. et al. New Insights into Structure and Hydration of Stratum Corneum Lipid Model Membrane Using Neutron Diffraction // Proc. of the Germany–JINR User Meeting «Condensed Matter Physics with Neutrons at the IBR-2 Pulsed Reactor», Dubna, June 2004. Dubna, 2004.
12. Анджеевски Ю. и др. // ЯФ. 2004. Т. 67, № 7. С. 1257–1262.
13. Oprea A. I. et al. Evaluation of the Forward-Backward Coefficient in the $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ reaction // Proc. of the XII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics» (ISINN-12). Dubna, 2004. P. 201–204.
14. Mütterer M. et al. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 738. P. 122.
15. Crawford B. E. et al. // Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1269.
16. Суховой А. М., Хумпов В. А. // ЯФ. 2004. Т. 67, № 4. С. 684–693.
17. Ermakova E. V., Frontasyeva M. V., Steinnes E. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2004. V. 259, No. 1. P. 51–58.
18. Belushkin A., Kuzmin E., Shvetsov V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 529. P. 249–253.
19. Shvetsov V. et al. Developments of Gas-filled Detectors at FLNP // Proc. of Germany–JINR User Meeting «Condensed Matter in Physics with Neutrons at IBR-2 Pulsed Reactor», Dubna, June 12–16, 2004. Dubna, 2004. P. 110–112.
20. Кирилов А. и др. // ПТЭ. 2004. Т. 3. С. 65–77.
21. Kirilov A. et al. New Generation of the IBR-2 Instrument Control Software in the Windows Environment // Proc. of Germany–JINR User Meeting «Condensed Matter in Physics with Neutrons at IBR-2 Pulsed Reactor», Dubna, June 12–16, 2004. Dubna, 2004. P. 118–121.
22. Kirilov A. et al. SONIX+ the New Instrument Control Software at the IBR-2 Reactor // Proc. of the Intern. Workshop «New Opportunities for Better User Group Software», Villigen PSI, Switzerland, Oct. 18–20, 2004 (in press).
23. Levchanovski F. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 529. P. 413–416.