

ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР ИБР-2М

Доктор физико-математических наук Виктор АКСЕНОВ,
научный руководитель
Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка
Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ)
(Дубна, Московская область)

Характерная особенность науки XXI в. — междисциплинарность, позволяющая рассматривать окружающий мир сразу в нескольких уровнях. Для реализации этого способа познания лучше всего подходят мегаустановки — источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах, ускорительные и реакторные установки для генерации нейтронов. К ним относится и пульсирующий ядерный реактор ИБР-2М, создание которого завершается в этом году в Объединенном институте ядерных исследований. 17 декабря 2010 г. первые 4 кассеты с топливом были установлены в активной зоне реактора. Начался длительный этап испытаний. В сентябре 2011 г. после сдачи объекта в эксплуатацию установка начнет полноценно работать на эксперимент. На территории России ИБР-2М — первый в этом столетии новый источник нейтронов мирового класса для изучения строения вещества, углубления знаний о структуре и свойствах материи, создания функциональных материалов, развития нано- и биомедицинских технологий.

ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ XXI ВЕКА

Идея такой установки возникла в 1955 г. в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск Калужской области) в период бурного развития ядерного реакторостроения. Тогда все страны хотели иметь устройства

для выработки энергии или производства радиоактивных веществ — это считалось признаком научно-технической и экономической мощи. Импульсный быстрый реактор (ИБР) был создан в 1960 г. под руководством автора идеи — известного советского физика, члена-корреспондента АН СССР Дмитрия

**Подвижный отражатель
вращается в кожухе
в атмосфере
газообразного гелия.
Перед установкой
на реакторе
он проходит комплексные
испытания на стенде.**



Блохинцева, ставшего в 1956 г. директором только что образованного в Дубне Международного центра ядерных исследований (впоследствии ОИЯИ)*. Один из основателей квантовой теории, лауреат Нобелевской премии 1922 г., иностранный член АН СССР с 1924 г. Нильс Бор во время посещения подмосковного института в 1962 г. выразил восхищение смелостью творцов этого чуда реакторной техники – «мигающей атомной бомбы», по образному выражению Блохинцева. После успеха Дубны многие пытались реализовать принцип ИБР для создания реактора большей мощности. Однако удачное решение нашли только ученые ОИЯИ: в 1984 г. здесь вступила в строй новая установка ИБР-2**, и Россия стала единственной в мире страной, предложившей, реализовавшей и развивающей идею пульсирующих реакторов. Основные узлы и топливо для нее изготовили на предприятиях Министерства среднего машиностроения СССР.

25 декабря 2006 г. после успешной 20-летней работы и выработки ресурса важных частей (корпус, активная зона, система управления и защиты) ИБР-2 остановили и перевели в режим модернизации, которая завершается в этом году. За несколько лет на тех же площадях специалисты ОИЯИ создали, по существу, новый пульсирующий реактор периодического действия ИБР-2М, что стало возможным благодаря идеологической и финансовой поддержке Министерства атомной энергии РФ (правопреемник Минсредмаша) и участию его предприятий.

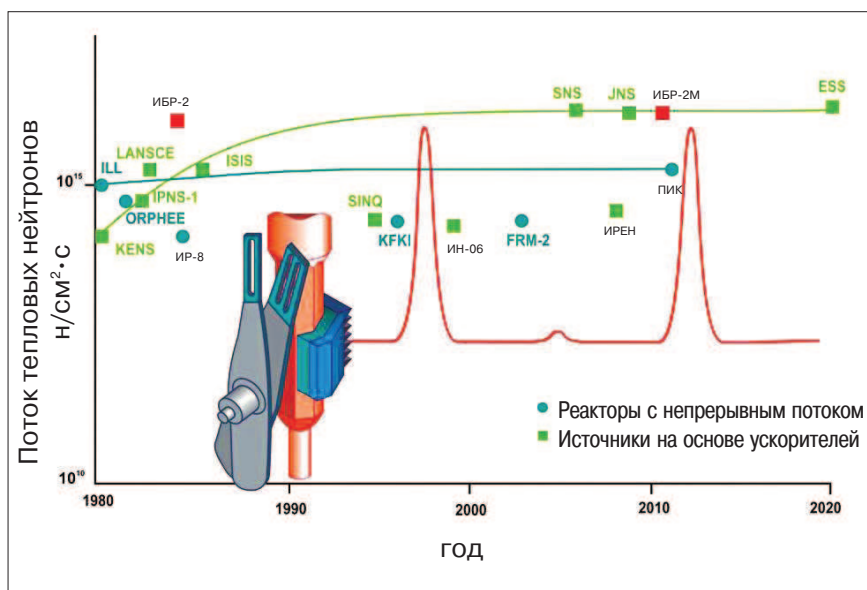
*См.: А. Сисаян. Мировая слава Дубны. — Наука в России, 2006, № 2 (прим. ред.).

**См.: В.Аксенов. Ядерный импульсный реактор. — Наука в России, 2002, № 6 (прим. ред.).

Главное и оригинальное отличие рассматриваемой установки от других подобных — в механической модуляции реактивности с помощью подвижного отражателя. Эта сложная система общей массой до 60 т состоит из двух частей: основного и дополнительного подвижного отражателя. Их роторы, в отличие от ИБР-2, вращаются с различными скоростями встречно. При одновременном совмещении обоих отражателей вблизи зоны реактора развивается мощность в 1500 МВт с генерацией импульсного потока тепловых нейтронов выше 10^{16} н/см²·с, что сравнимо с таковым на двух суперисточниках, реализованных на базе протонных ускорителей JNS (Япония) и SNS (США) и принятых в эксплуатацию в 2007 и 2009 гг. соответственно. Средняя мощность реактора ИБР-2М — 2 МВт, частота повторения импульсов — 5 Гц. Их длительность определяется двумя факторами: временем жизни быстрых нейтронов, а также конфигурацией и скоростью вращения роторов. Для основного подвижного отражателя она снижена в 2,5 раза (до 600 об./мин). Однако за счет встречного движения длительность импульса быстрых нейтронов сохраняется на уровне 200 мкс, но вместе с тем существенно (в 2,5 раза) возрастает ресурс отражателя (до 50 000 ч).

Обладая рекордным потоком нейтронов, реактор ИБР-2М остается экономичной и относительно дешевой машиной. Его модернизация обошлась примерно в 400 млн руб. Активация оборудования и выгорание зоны благодаря низкой средней мощности происходят медленно. При установившемся режиме работы 2500 ч/год время использования топлива и подвижного отражателя составит 20–25 лет.

Для ряда выведенных из реактора пучков будет существенно повышен поток холодных нейтронов с помощью криогенного замедлителя, что особенно



Принципиальная схема активной зоны реактора ИБР-2М: бак с топливом из двуокиси плутония и подвижный отражатель.

важно для исследований в области нано- и биологических наук. Безопасность и эксплуатационная надежность реактора соответствуют современным требованиям.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА

Нейтронные методы изучения вещества (дифракция, рефлектометрия, неупругое и малоугловое рассеяние) дают детальную информацию об особенностях строения, магнитной структуре и атомной динамике материалов на микроскопическом уровне. Уникальные характеристики — высокая проникающая способность, прецизионное исследование соединений с легкими, магнитными атомами, изотопами — делают эти методы зачастую единственно возможными для решения широкого круга актуальных фундаментальных и прикладных задач физики конденсированных сред.

Научная программа на ИБР-2М ориентирована в первую очередь на изучение нано- и биосистем*. В отдельную область выделены исследования наноструктур из ферромагнитного и сверхпроводящего слоев. Магнитно упорядоченные, они могут использоваться в качестве более совершенных элементов в нанoeлектронике. Наша задача — установить соответствие между ядерной и магнитной структурами с пространственным разрешением до 1 нм методом рефлектометрии поляризованных нейтронов.

При изучении магнитных жидкостей и наноконпозигов (в том числе полимеров и гранулированных систем) ключевую роль играет рассеяние нейтронов, с помощью которого измеряют структурные параметры коллоидов, определяют механизмы их стабилизации, межчастичного взаимодействия и кластерообразования в различных типах жидких и твердых носителей, включая биосовместимые среды. Результаты

этих работ будут использованы для улучшения существующих процедур синтеза и создания новых классов магнитных коллоидов с требуемыми свойствами.

Следующее направление связано с изучением механизмов агрегации и стабилизации углеродных наночастиц в растворах фуллеренов* и нанодиамагнетиков, выявлением связи между структурной рассматриваемых систем и их физико-химическими свойствами.

Специалисты будут изучать также надмолекулярную (обусловленную различными видами упорядочения макромолекул) структуру полимеров, определять функциональные характеристики коллоидных и полимерных нанодисперсных материалов, фазовые переходы поверхностно-активных веществ, особенности строения новых полимеров, пригодных для технологических целей.

Наиболее перспективные работы лежат в области биологии и биотехнологии и связаны с исследованием наноструктуры и свойств липидных мембран и комплексов, определением роли отдельных керамидов (важных компонентов клеточной мембраны) в формировании диффузионных свойств матрицы верхнего слоя кожи человека, созданием однослойных везикул — базисного инструмента клетки, обеспечения метаболизма и транспорт лекарств через кожу. Большой цикл работ посвящен определению структурных и функциональных характеристик биологических макромолекул белка, ДНК, РНК.

В последние два столетия ученым удалось синтезировать ряд оксидных материалов, обладающих необычными физическими свойствами: высокотемпературной сверхпроводимостью, колоссальным магнетосопротивлением, сочетанием магнетизма и сегнетоэлектричества, причем трансформирующимися при изменении внешних условий или параметров окружающей среды. Они зависят от особенностей кри-

*См.: В.Аксенов. Нейтроны в нанодиагностике. — Наука в России, 2010, № 4 (прим. ред.).

*Фуллерены. — Наука в России, 2000, № 6 (прим. ред.).

**Твэлы (тепловыделяющие элементы)
для ИБР-2М
изготовили на Производственном
объединении «Маяк»
(город Озерск Челябинской области),
их сборку в кассеты
осуществили в ОИЯИ
на специализированном участке.**



сталлической и магнитной структур, в распознавании которых эффективна нейтронная дифрактометрия. Ее, как и другой метод — нейтронную спектроскопию, будут широко применять на ИБР-2М при изучении новых функциональных материалов.

В отдельную область у нас выделены материаловедческие работы, направленные, в частности, на определение внутренних напряжений в объемных материалах с помощью метода дифракции. Отличающийся высокой точностью и значительной глубиной проникновения нейтронов в образец, он выявляет точечные дефекты, дислокации, межфазные границы, микротрещины, поры. Эта информация крайне важна при создании изделий для атомной науки и техники, соответствующих деталей и узлов машин и механизмов.

Что касается наук о Земле, то в рамках данной тематики мы планируем эксперименты по нейтронографическому анализу текстуры геологических материалов, определению закономерностей возникновения неустойчивости горных пород, находящихся под воздействием высоких температур и давлений, в том числе в процессе фазового (полиморфного) перехода. Эти данные расширят знания о геологии планет и процессах, происходящих в очагах землетрясений*.

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Для реализации научной программы на реакторе ИБР-2М создан комплекс из 12 спектрометров — современных приборов, позволяющих использовать практически все преимущества нейтронов при структурных исследованиях. Это — оригинальные отечественные разработки, некоторые из них открывают новые возможности для современных установок. К

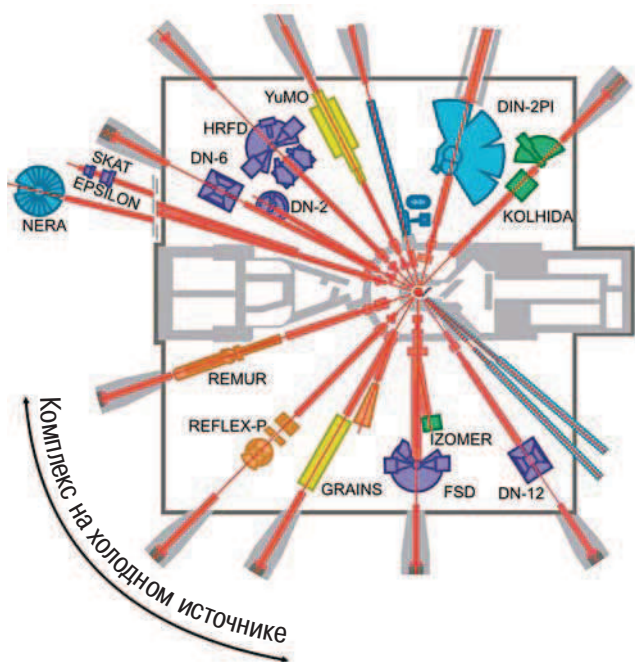
*См.: Л. Дола и др. Космический мониторинг предвестников землетрясения. — Наука в России, 2009, № 6 (прим. ред.).

таким в первую очередь относят фурье-дифрактометр высокого разрешения, разработанный в Дубне в 1992 г. в кооперации с петербургским Институтом ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН и Центром нейтронных исследований Финляндии. Он способен расшифровывать кристаллическую структуру с предельной для нейтронной дифракции точностью до 0,0001 доли межатомного расстояния. С учетом этого фактора мы создаем на модернизированном реакторе специализированный фурье-дифрактометр для анализа внутренних напряжений в материалах. Заметим, наш опыт работы с данным прибором использован при выборе проекта будущего европейского источника нейтронов European Spallation Source (ESS).

Программа модернизации комплекса продолжится и в 2011 г. В настоящее время на стадии завершения находятся три проекта. Первый касается замены нейтроннопроводной системы длиной 110 м для спектрометров ЭПСИЛОН, СКАТ (созданы при активном участии физиков ФРГ) и НЕРА (идея и реализация польских специалистов), ориентированных на изучение внутренних напряжений в инженерных конструкциях, текстуры материалов, преимущественно горных пород, атомной и молекулярной динамики сложных систем и функциональных материалов.

Второй проект связан с новым дифрактометром ДН-6 для изучения материалов при высоких давлениях (до 50 ГПа) и низких температурах (до 10К), в котором найдут применение сапфировые наковальни. По сути же — это усовершенствованный дифрактометр ДН-12, разработанный в середине 1990-х годов учеными Дубны и Российского научного центра «Курчатовский институт» (Москва).

Третий проект по разработке оригинального рефлектометра ГРЭЙНС с горизонтальной плоскостью образца мы реализуем в тесной кооперации с физиками Германии и Венгрии при участии Научно-обра-



Экспериментальный зал реактора ИБР-2М имеет 14 каналов вывода нейтронов, на которых располагаются установки.



зовательного центра по нанотехнологиям Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Подобных приборов у нас еще не было, хотя потребность в них в последнее время очень возросла из-за повышенного интереса к наносистемам. С такой техникой можно будет изучать свободные поверхности жидкой среды в гравитационном поле, а также межфазные границы в системах воздух-жидкость, жидкость-жидкость, жидкость-твердое тело. Кроме того, ГРЭЙНС открывает дорогу к исследованию магнитных свойств жидкостей с использованием поляризованных нейтронов.

К слову, рассматриваемый рефлектометр — часть уникального комплекса нанодиагностики на источнике холодных нейтронов реактора ИБР-2М с длиной волны больше 0,4 нм, что и требуется для изучения наносистем. Входящий в его состав оригинальный криогенный замедлитель, работающий при низкой температуре в интервале 20–40 К и использующий радиационно-стойкий материал (смесь ароматфических углеводородов) с новой технологией его загрузки и эксплуатации, позволяет увеличить поток холодных нейтронов более чем в 10 раз на четырех каналах вывода пучка нейтронов. В комплекс, кроме ГРЭЙНСА, входят еще 3 установки: РЕМУР — рефлектометр поляризованных нейтронов, имеющий самые высокие по мировым стандартам параметры, РЕФЛЕКС для перспективных методических разработок и апробации новых методов нейтронной оптики, а также крайне востребованный спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов (к сожалению, финансовых средств для его сооружения пока нет).

Мегаустановки, подобные ИБР-2М, создают для широкого круга исследователей, представляющих отечественные и зарубежные университеты и институты. Чтобы реактор функционировал полноценно (2500 ч/год на 14 нейтронных пучках), необходимо соответствующее финансирование — примерно 30 млн руб. ежегодно при условии общепринятого в мировой практике выделения сторонним пользователям 70% его рабочего времени. Будут ли привлечены такие средства — большой вопрос.

Наконец, такие установки служат экспериментальной базой для подготовки специалистов. В ОИЯИ эта работа традиционно поставлена на высоком уровне*. В его Учебно-научный центр приезжают на специализацию студенты и аспиранты из стран-участниц ОИЯИ, обучение наших старшекурсников проводят кафедры нейтронографии МГУ им. М.В. Ломоносова и нейтронной физики Петербургского политехнического университета с научной базой в Институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН. И нам удается обеспечивать квалифицированными кадрами не только ведущие нейтронные центры мира, но и свой, дубнинский. В этом смысле будущее научной программы на реакторе ИБР-2М выглядит вполне оптимистично.

*См.: А. Сисакян. Каркасные проекты — прорыв в будущее. — Наука в России, 2008, № 6 (прим. ред.).

Иллюстрации предоставлены автором