

3. К истории импульсных исследовательских реакторов в ЛНФ

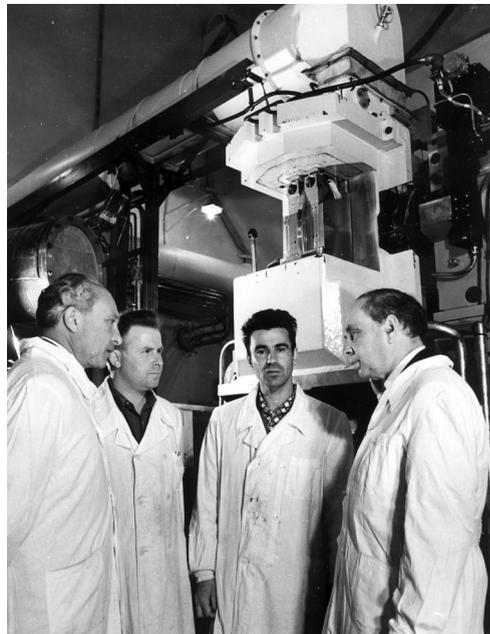
После пуска и успешной эксплуатации первого ИБРа все последующие импульсные реакторы создавались только в Дубне, если не принимать во внимание японский реактор YAYOI и серийные реакторы типа TRIGA, которые могут работать только в режиме редко повторяющихся импульсов (не чаще одного раза за несколько минут).

С целью упрощения конструкции уникального, впервые сооружаемого реактора, средняя мощность ИБРа была выбрана небольшой – 1 кВт (при этом мгновенная мощность в импульсе достигала 5 МВт). В дальнейшем В.Д.Ананьевым была обоснована возможность при повышении расхода охлаждающего воздуха повысить среднюю мощность реактора до 6 кВт, и с 1964 года реактор работал на мощности от 2 до 6 кВт.

Вообще довольно длинный импульс реактора (50 мкс) был более адекватен задачам физики конденсированных сред. Для сокращения импульса первый ИБР, по предложению Ф.Л.Шапира, с 1965 года начал использоваться в режиме размножения нейтронных импульсов нейтроно-производящей мишени электронного ускорителя-микротрона. С пуском импульсного бустера (так назвали тандем ускорителя и ИБРа) длительность нейтронного импульса сократилась до трех мкс, а фактор качества импульсного источника нейтронов N/θ^2 , введенный Ф.Л.Шапиро (N – интенсивность источника, или поток нейтронов, с поверхности замедлителя, а θ – длительность нейтронной вспышки), увеличился почти на два порядка.

В 1966 году на ИБРе был осуществлен режим импульсов с переменной амплитудой, а также режим редких импульсов с периодом повторения 5 секунд. Для создания такого режима понадобился модулятор реактивности с тремя подвижными элементами, синхронизированными между собой. Два более быстрых модулятора были те же, что и в обычном режиме 5–10 Гц, а именно: вращающиеся стальные диски с запрессованными в них урановыми вкладышами. Третьим элементом модулятора реактивности был качающийся (вверх-вниз) стержень из вольфрама. В режиме редких импульсов пиковая мощность была 1 ГВт.

Первый ИБР завершил работу в августе 1968 года. Примечательно, что последним экспериментом на этом реакторе был знаменитый опыт по первому наблюдению ультрахолодных нейтронов, осуществленный как раз в режиме редких импульсов. 10 июня 1969 года был введен в работу усовершенствованный аналог ИБРа – ИБР-30 («30», потому что проектная средняя мощность его



Ф.Л.Шапира, А.И.Бабаев, В.Т.Руденко
и И.М.Франк у зоны реактора ИБР-30
(1969 г.)

была 30 кВт, но работал реактор на мощности 20–25 кВт). Увеличение мощности достигнуто изменением конструкции плутониевых твэлов и введением в стальной диск двух урановых вкладышей (модуляторов реактивности) вместо одного. Был сохранен режим редких импульсов с периодом пульсации до 13 секунд. неполадки в механической системе привода вольфрамового стержня послужили причиной аварии на ИБР-30 в 1972 году. После этого события режим редких периодических импульсов был аннулирован.

Бустерный режим (а ИБР-30 использовался попеременно в режиме реактора и в режиме бустера до 1986 года, когда была отменена работа в режиме реактора) осуществлялся с линейным резонансным ускорителем ЛУЭ-40 в качестве инжектора с энергией ускоренных электронов 44 МэВ и током в импульсе 0,2 А. Средняя мощность в режиме бустера была 10 кВт при полуширине вспышки быстрых нейтронов 4 мкс. Высокая светосила спектрометра на ИБР-30 позволила открыть ряд совершенно новых направлений в исследовании ядра и физике конденсированных сред.

Бустер ИБР-30 выведен из эксплуатации в 2001 году с тем, чтобы в дальнейшем заменить его бустером с существенно более коротким импульсом, более адекватным исследованиям по фундаментальной и прикладной ядерной физике. Работу по проекту нового бустера возглавили и активно продвигали В.Л.Аксенов, Ю.П.Попов и В.Т.Руденко. Объявленный конкурс на создание нового линейного ускорителя для бустера с напряженными исходными параметрами – 10 кВт мощность пучка при продолжительности импульса не более 250 нс и частоте повторения 100–150 Гц при длине ускорителя не более 8 м – выиграла группа Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН. В 1992 году при активном участии В.Л.Ломидзе, А.К.Красных и В.И.Фурмана была окончательно сформулирована концепция нового источника, получившего имя ИРЕН (Источник Резонансных Нейтронов). Официальный статус проекта новой базовой установки ОИЯИ ИРЕН получил на 75-й сессии Ученого совета в мае 1994 года. Тогда же руководителем проекта был назначен В.И.Фурман, главным инженером В.Д.Ананьев и ответственным за ускорительную часть ИРЕН А.К.Красных, НИКИЭТ выступил разработчиком проекта мишенной части. Вследствие недостаточного финансирования проекта ИРЕН к настоящему времени завершено лишь изготовление ускорительных секций и начат монтаж ускорителя в здании 43, а также изготовлены плутониевые твэлы на комбинате «Маяк». Дирекция ОИЯИ делает все возможное, чтобы изыскать средства, необходимые для успешного завершения проекта с тем, чтобы новый современный источник нейтронов ИРЕН работал на ядерную физику в обозримом будущем.

Как результат успешного начала программы изучения структуры и динамики конденсированных сред на первом реакторе ИБР, уже в 1963 году начались предварительные расчетные работы по обоснованию возможности создания значительно более мощного ИБРа, по своим нейтронным характеристикам для исследований методами рассеяния медленных нейтронов не уступающего 50–100 мегаваттным стационарным реакторам (HFR в ИЛЛ, Гренобль, SM-2 в НИИАР, Димитровград, ПИК в ПИЯФ, Гатчина) и имеющимся тогда на уровне концепций источникам на основе протонных ускорителей (spallation neutron sources, SNS). В начале 1966 года было принято решение о начале проектных работ по новому реактору ИБР и курирование этих работ от дирекции ЛНФ было возложено на Ю.С.Язвницкого.



Начало работ по проектированию реактора ИБР-2
Слева направо: Е.П.Шабалин, А.Навроцки, В.М.Назаров, Ю.С.Язвицкий,
Б.И.Куприн, В.Д.Ананьев

Интенсивная работа над созданием импульсного реактора средней мощностью 5–10 МВт под названием ИРМ началась в 1967 году, после того как были опубликованы проекты мощных реакторов типа ИБР в Европе (SORA) и в США, Брукхейвенская лаборатория. Ни один из этих зарубежных проектов, однако, не был реализован. Между прочим, в этих проектах имелись принципиальные, фатальные погрешности, которые не позволили бы иметь декларируемые параметры (мощность и длительность импульса). Например, реактор по Брукхейвенскому проекту вместо 30 МВт средней мощности смог бы работать только на мощности не выше нескольких мегаватт вследствие так называемой «импульсной» неустойчивости, которая принципиально присуща импульсным реакторам периодического действия и была открыта в ЛНФ. В Дубне же новый реактор с проектной мощностью 4 МВт под названием ИБР-2 был построен к 1977 году с участием НИКИЭТ, ГСПИ, ВНИИНМ и других институтов и организаций СССР и стран-участниц ОИЯИ. Физический пуск был завершён в 1978 году, а начало официальной эксплуатации пришлось на апрель 1984 года. Продолжительный период пуска реактора объясняется новизной проблемы и стремлением снизить до минимума риск предаварийных ситуаций. Среднюю мощность решили ограничить двумя мегаваттами для обеспечения предельно возможной ядерной безопасности и надёжности установки, а длительность импульса оказалась равной 216 мкс вместо проектного значения 90 мкс. Но и с этими параметрами ИБР-2 стал и остаётся одним из наиболее эффективных импульсных источников медленных нейтронов для исследования конденсированных сред.



Р.Мёссбуэр, Т.Ф.Дмитриева и И.М.Франк обсуждают проект ИБР-2

Конструкция активной зоны ИБР-2 определялась в первую очередь требованиями получения высоких нейтронных потоков порядка $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в импульсе при малой длительности импульсов. Это возможно только на реакторе, имеющем мощность несколько мегаватт. Поэтому пришлось отступить от принципиальной схемы первых ИБР, т. к. при ней нельзя обеспечить необходимый теплосъем с подвижных элементов модулятора реактивности, содержащих делящиеся элементы. Для ИБР-2 была принята схема, при которой модуляция реактивности осуществляется за счет перемещения основного и дополнительного отражателей нейтронов около активной зоны. Поскольку материал отражателя не содержит делящихся элементов, теплосъем с него легко обеспечивается потоком газообразного гелия. Подвижный отражатель — модулятор реактивности выполнен в виде двух лопастей сложной конфигурации, имеющих радиус 1,2 м и массу несколько сот килограммов каждая. Лопать основного отражателя вращается со скоростью до 1500 об/мин в плоскости, параллельной касательной к поверхности зоны. Импульс мощности возникает при одновременном прохождении обеих лопастей около зоны. Для гарантий безопасности и постоянства амплитуд импульсов мощности механизм вращения лопастей выполнен с очень высокой точностью. Так, флуктуации положения конца лопасти в момент прохождения около активной зоны не превышают нескольких десятков микрометров. Специальная электронная система контролирует стабильность работы отражателя.

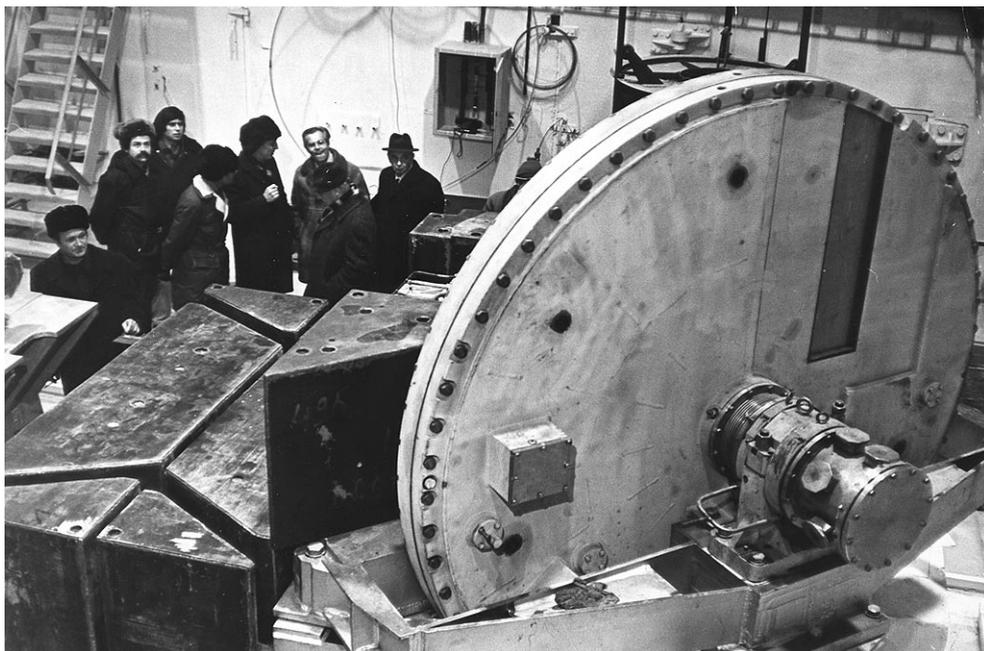
Требование получения высоких нейтронных потоков при малой длительности импульсов привело также к необходимости создания компактной зоны с большим



Сборка подвижного отражателя ИБР-2 на стенде

удельным тепловыделением и малым временем жизни нейтронов. Была выбрана активная зона из окиси плутония с натриевым охлаждением, аналогичная активной зоне реактора БР-5, построенного в Физико-энергетическом институте в 60-х годах. Это решение позволило, с одной стороны, удовлетворить достаточно полно требования к реактору как к источнику нейтронов, а с другой – использовать уже испытанные технические решения и хорошо разработанную промышленную технологию как при изготовлении активной зоны ИБР-2, так и при изготовлении, наладке и эксплуатации натриевой системы ее охлаждения. Система натриевого охлаждения функционирует с момента ее запуска в 1981 году до настоящего времени успешно и непрерывно и во время работы реактора, и в остальное время.

Подвижный отражатель – один из наиболее ответственных и технически самых оригинальных узлов ИБР-2. Он не имеет аналогов не только в реакторостроении, но и в других областях техники. Именно подвижный отражатель определяет длительность импульса мощности ИБР – его важнейший параметр, от которого зависит разрешение нейтронного спектрометра на пучке реактора как в дифракционных экспериментах, так и в исследованиях методом неупругого рассеяния нейтронов. Пробная частица для изучения структуры и динамики вещества – это тепловой нейтрон, время диффузии которого в водородосодержащих веществах внешнего замедлителя составляет 100–200 мкс. Поэтому желательная длительность импульса быстрых ней-



**Р.Мёссбауэр и И.М.Франк с группой сотрудников
на испытательном стенде подвижного отражателя ИБР-2**

тронов реактора – порядка 100 мкс. Первый вариант подвижного отражателя, с которым осуществлялся физический пуск реактора в 1978 году, не мог обеспечить импульс короче 300 мкс в рабочем режиме. Дело в том, что «дополнительный подвижный отражатель» (ДПО) целесообразно размещать за основным отражателем, расположенным ближе к активной зоне (ОПО); это увеличивает угол обзора реактора экспериментальными устройствами. В то же время такое расположение отражателей приводит к возникновению «теневого» эффекта реактивности, причиной которого является экранировка одного блока отражателя другим. Этот эффект снижает скорость изменения реактивности при формировании импульса мощности и приводит к увеличению его длительности. В результате проведенных в ЛНФ расчетных и экспериментальных исследований на стендах ЭПОС была найдена конфигурация ДПО (так называемый «трезубец»), для которой «теновой» эффект реактивности незначителен. Три модулятора реактивности с ДПО в виде трезубца работали на ИБР-2 с момента пуска до 2003 года, по 6–7 лет каждый.

Вредный теневой эффект реактивности превращается в полезный при «зубчатой», или «решетчатой», структуре обоих ПО. Идея такого модулятора реактивности была предложена сотрудниками ЛНФ еще в 1971 году. Суть состоит в том, что при решетчатой структуре оба ПО – и основной и дополнительный – двигаются в противоположных направлениях. При этом реактивность изменяется на значительную величину уже за малое время, равное времени взаимного перекрытия «зубьев», обеспечивая короткую длительность импульса. Для реактора ИБР-2 был разработан модулятор



В.Д.Ананьев, Э.И.Витальев и И.М.Франк в момент монтажных работ на ИБР-2

этого типа для работы на больших скоростях ОПО и ДПО (1500 и 1200 об/мин), что обеспечило бы полуширину импульса мощности реактора 110 ± 5 мкс вместо 216 мкс для ПО с «трезубцем» ДПО при той же скорости вращения. Однако финансовые трудности 90-х годов заставили отказаться от реализации этого проекта (пришлось бы изготавливать сложную и дорогую машину каждые 5 лет). Вместо этого был создан решетчатый отражатель из никелевого сплава на медленную скорость вращения при сохранении длительности импульса мощности. Он успешно прошел пуск на реакторе в 2004 году, показав 220 мкс при скорости ОПО только 600 об/мин. Работа на медленных скоростях вращения позволяет продлить ресурс безопасной эксплуатации ПО до 20 лет. Этот же отражатель будет работать и на модернизированном реакторе ИБР-2М (о нем будет сказано ниже).

Ведущие научные центры мира, использующие нейтронные методы, развивают сейчас базу источников на основе сильноточных протонных ускорителей на энергию 1–1,5 ГэВ, так называемых spallation neutron source (SNS). Однако низкая частота повторения импульсов реактора ИБР-2 и высокая пиковая плотность потока нейтронов на поверхности замедлителя ($5 \cdot 10^{15}$ н/см²/с для широких пучков и 10^{16} н/см²/с для коллимированных пучков) рассматриваются как преимущество реакторных источников нейтронов, так как это позволяет исследовать широкую область передачи импульсов, изучать слабо рассеивающие образцы, использовать узкую коллимацию для улучшения пространственного разрешения. Большая длительность импульса (320 мкс по тепловым нейтронам) считалась ранее естественным недостатком ИБР-2

из-за ограничения временного разрешения спектрометров при использовании традиционных методик. Однако внедрение техники Фурье-дифрактометрии и других современных методик в корне изменило ситуацию. Показательно, что некоторые мишени проектируемых SNS ориентированы на длинный импульс нейтронов – порядка миллисекунд. Возможности для нейтронных исследований на лучшем сейчас SNS ISIS в Англии (Резерфордская лаборатория), пущенном позднее ИБР-2, не выше возможностей ИБР-2. Лишь в следующем году, то есть через 20 лет после пуска ИБР-2, вступит в строй мощный SNS в США (Ок-Ридж), параметры которого превзойдут в несколько раз нынешние параметры ИБР-2.

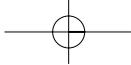
Традиционные источники нейтронов – стационарные исследовательские реакторы – также продолжают использоваться для экспериментов с помощью медленных нейтронов. Реакторы с большим потоком нейтронов имеют, как правило, многоцелевое назначение и более универсальны. Однако сооружение и эксплуатация такого реактора на порядок дороже, чем ИБР-2. К тому же для широкого класса исследований, в которых используется метод времени пролета нейтронов, ИБР-2 имеет преимущества перед стационарными реакторами. Еще более дороги упоминавшиеся ранее источники на основе протонных ускорителей.

Работа по созданию импульсного исследовательского реактора ИБР-2 была удостоена премии Правительства РФ в 1996 году, а научные работы по освоению метода дифракции нейтронов по времени пролета на импульсных источниках ЛНФ – Государственной премии РФ в 2000 году.



Физический пуск реактора ИБР-2 состоялся!

Дата	Время	Содержание записей за смену, заданий, распоряжений выполненных работ, подписи о сдаче и приемке смены	Примечание
1	2	3	4
30.11.72	17 ⁴⁵	Спрос МАЗ на скорость света (2 из 3-х ПКУ)	
	17 ¹⁵	Все органы СВЗ вводу. Силу защиты: Олу	
		30 ноября 1972.	
		в 16 ²⁰ реактор ИБР-2	
		достиг критического	
		состояния.	
		И.И. Троицкий	



Любой реактор имеет ограниченный ресурс работы вследствие развития радиационной «усталости» конструкционных материалов. В середине 90-х годов главным инженером В.Д.Ананьевым и научным руководителем В.Л.Аксеновым была инициирована программа модернизации реактора ИБР-2 с тем, чтобы заменить большую часть его узлов, ресурс которых истекает в 2007 году. Модернизация предполагает, наряду с заменой, одновременное усовершенствование важнейших элементов, таких как корпус реактора, стационарный отражатель, исполнительные блоки аварийной защиты, внешние замедлители нейтронов — с целью повышения надежности и долговечности. Кроме того, разработанная новая концепция композиции и размещения замедлителей нейтронов вокруг модернизированного реактора ИБР-2М позволит создать наилучшие условия для эффективного использования модернизированных и новых спектрометров. На новом реакторе планируется расширить возможность использования холодных нейтронов в соответствии с возрастающим интересом к исследованиям нано- и мезоскопических структур в физике твердого тела и биологии. К существующим спектрометрам планируется добавить два новых рефлектометра и две установки малоуглового рассеяния. Поставленная задача оптимизации эффективности спектрометров решается путем разработки замедлителей сложной композиции, где спектр нейтронов существенно зависит от места вылета нейтрона и угла вылета, так называемых «комби-замедлителей». Комби-замедлитель совмещает в себе и обычные водяные замедлители, и «холодные» замедлители на основе замороженных до 20 К углеводородов.

Исследовательский импульсный реактор ЛНФ ОИЯИ ИБР-2 пока остается самым эффективным в мире источником для исследований на выведенных пучках медленных нейтронов, а после модернизации он еще в течение 20 лет будет в первой пятерке мировых лидеров в этой области ядерной науки.

Таким образом, путь развития нейтронных источников в ОИЯИ был выбран, безусловно, правильно, что стало особенно актуально в период реформ в России с постоянным дефицитом средств. ОИЯИ был бы не в состоянии эксплуатировать гигантскую, дорогостоящую машину, какой является SNS. В течение 50-летнего существования ОИЯИ имел и будет иметь в дальнейшем прекрасные возможности для научных исследований с помощью нейтронов благодаря изящной идее пульсирующего реактора, рожденной в Обнинске в 1955 году и эффективно использованной в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка.

4. Нейтронно-ядерные исследования

Нейтронная спектроскопия

Исследования взаимодействий нейтронов с ядрами открывали уникальные возможности по изучению свойств ядер и получению данных о сечениях, характеризующих эти взаимодействия. Спектроскопические исследования на ИБРе развивались активно в период, когда данные о параметрах нейтронных резонансов были ограничены, поэтому усилия были направлены на изучение ядер, для которых данных не было совсем или их было мало. Развитию спектроскопических исследований способствовало и то, что в Фонде стабильных изотопов СССР был накоплен широкий ассорти-

