

ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.Л.Аксенов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены состояние и перспективы импульсных реакторов как источников нейтронов для физических исследований свойств атомного ядра и конденсированных сред. Обсуждаются их достоинства и ограничения в сравнении с другими источниками нейтронов.

The present status and the prospects for development of pulsed reactors as neutron sources for physical investigations of atomic nuclei and condensed matter are considered. Their advantages and disadvantages in comparison with other neutron sources are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике нейтроны используются для изучения фундаментальных взаимодействий (время жизни нейтрона, нарушение пространственной четности и симметрии обращения времени) и структуры ядра, но более широко — в области физики конденсированных сред, биологии, химии, материаловедения, неразрушающего контроля промышленных изделий.

Можно выделить следующие крупные разделы в этих областях: кристаллография, магнетизм, жидкости (включая сверхтекучие) и аморфные тела, поверхности и слоистые системы, биологические мембраны, белки, химические реакции, полимеры, старение материалов, элементный анализ, внутренние напряжения, текстура. Необходимо подчеркнуть, что большинство этих исследований направлено на изучение не просто свойств новых материалов, хотя и это важно, а новых физических явлений, которыми постоянно снабжает естествознание физика конденсированных сред. Одним из последних примеров решающей роли нейтронов в изучении новых физических явлений может служить расшифровка структуры высокотемпературных сверхпроводников.

Информативность исследований с нейтронами увеличивается на более интенсивных источниках. Происходит это за счет не только увеличения скорости проведения экспериментов, но и открывающихся новых возможностей, к которым можно отнести увеличение точности измерений, изучение объектов малых размеров, сложных объектов и объектов с малыми сечениями рассеяния, проведение экспериментов с анализом поляризации нейтрона до и после рассеяния. Поэтому естественно стремление нейтронного сообщества иметь более интенсивные источники нейтронов.

До сих пор основными интенсивными источниками нейтронов для физических исследований остаются ядерные реакторы с непрерывным потоком, хотя уже в 50-х годах было предложено использовать ускорители для этих целей [1]. Первый ядерный реактор был создан под руководством Э.Ферми в 1942 г. в Чикаго (США), интенсивные импульсные источники нейтронов на базе электронных ускорителей начали создаваться в Харуэлле (Великобритания) в 50-е годы [2].

Нет каких-либо весомых преимуществ реакторов перед ускорителями, но разрыв в 10 лет и бурное развитие реакторной техники именно в это время определили путь развития базы для нейтронных исследований.

С начала 90-х годов число реакторов неуклонно уменьшается, и в начале следующего столетия оно может достигнуть уровня 60-х годов. В то же время за последние 30 лет наблюдался большой прогресс в ускорительной технике, которая имеет большие перспективы. Поэтому очевидно, что следующий этап в создании интенсивных источников нейтронов связан с использованием ускорителей, преимущественно протонных.

В отличие от реакторов с непрерывным потоком, источники на базе ускорителей, как правило, испускают нейтроны импульсами, что требует применения других методов эксперимента — методов времени пролета. Методы времени пролета начали применяться уже в первые годы развития нейтронных исследований в ядерной физике. Однако для этого приходилось использовать прерыватели на нейтронных пучках реакторов, что заметно снижало их эффективность. Чтобы избежать этого, физики из ФЭИ (Обнинск, Россия) под руководством Д.И.Блохинцева предложили новый тип ядерного реактора — импульсный реактор периодического действия [3,4], который генерировал нейтроны импульсами с частотой, необходимой для проведения экспериментов. Первый такой реактор был введен в эксплуатацию в Объединенном институте ядерных исследований 23 июня 1960 г. [5].

Параллельно со строительством реактора в Лаборатории нейтронной физики под руководством И.М.Франка и Ф.Л.Шапиро готовилась физическая программа [6]. Результаты первых экспериментов были опубликованы в 1961 г. [5] одновременно с публикацией результатов, полученных на электронном ускорителе «Дженерал Атомик» (США) [7].

Таким образом, 35 лет назад Дубна стала родиной нового направления в области создания источников нейтронов для физических исследований и метода времени пролета при использовании рассеяния нейтронов в физике конденсированных сред. Оказались ли эффективными импульсные реакторы, какое место они занимают среди других типов источников, каковы перспективы их развития? Попытка ответить на эти вопросы составляет цель данной статьи.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

Исторически первыми интенсивными источниками нейтронов были ядерные реакторы, в которых постоянный поток нейтронов генерировался в процессе самопроизвольного деления урана. Ядерные реакторы с постоянным потоком имеют ограничения по возможно допустимому потоку нейтронов, обусловленные технологическими причинами, связанными, главным образом, с отводом тепла. В этом смысле определенную перспективу открывают импульсные реакторы периодического действия (пульсирующие реакторы), в которых модуляция реактивности повышает выход полезных для пучковых исследований нейтронов в сотни раз при той же средней мощности.

В следующем типе источника используется фотоядерная реакция и линейные электронные ускорители. Поскольку в фотоядерной реакции выход нейтронов мал: 1 нейтрон на 20 электронов с энергией 100 МэВ, то для повышения выхода нейтронов эффективными оказались размножающая мишень (бустер) и размножающая мишень с модуляцией реактивности (супербустер), для создания которых был использован опыт работы импульсного реактора периодического действия.

Наиболее продуктивной с точки зрения производства нейтронов является реакция испарения с использованием протонного синхротрона: ~ 30 нейтронов на 1 протон с энергией ~ 800 МэВ. Использование размножающих мишеней может увеличить выход нейтронов еще примерно в 20 раз.

Современная тенденция в создании высокопоточных источников нейтронов ориентирована на источники испарительного типа. В то же время развитие реакторных источников сохраняет свою актуальность по ряду причин. Во-первых, протонные синхротроны с необходимыми параметрами являются достаточно сложными и дорогими машинами. Во-вторых, практическая реализация мишенных устройств высокой мощности сталкивается с типичными реакторными проблемами, такими как отвод тепла и радиационная стойкость конструкции, определяемая плотностью потока быстрых нейтронов в спектре активной зоны или мишени. И, наконец, в

настоящее время имеется еще достаточно много работающих реакторов, имеющих перспективы развития.

Исследовательские ядерные реакторы как источники нейтронов получили широкое распространение с конца 50-х годов. В значительной степени этому способствовала деятельность Международного агентства по атомной энергии, образованного Организацией Объединенных Наций в 1957 году. МАГАТЭ провело большую работу по пропаганде использования природного урана для производства ядерного топлива, создания ядерных реакторов, организации их безопасной работы, а также производства изотопов для медицины, сельского хозяйства, промышленности и других целей. В результате в 60-х годах каждая индустриально развитая страна имела или стремилась иметь ядерные реакторы, поскольку это являлось признаком экономической мощи.

Помимо радиационных исследований и производства изотопов, ядерные реакторы с самого начала использовались для физических исследований на выведенных пучках нейтронов. Эти исследования оказались настолько информативными и существенными для задач ядерной физики и физики конденсированных сред, что с середины 60-х годов начали создавать источники нейтронов, уже специально оптимизированные для пучковых исследований.

Наибольшее число реакторов было создано в период с 1955 по 1960 гг. Это были реакторы первого поколения, которые создавались для облучений и радиационных исследований. После 1960 г. началось создание реакторов второго поколения, которые уже предназначались как для радиационных исследований, так и для исследований на нейтронных пучках. Первый реактор с непрерывным потоком третьего поколения, т.е. реактор, предназначенный для пучковых исследований, был создан в 1965 г. в Брукхэйвене, через 5 лет после создания пульсирующего реактора ИБР, который с самого начала предназначался только для пучковых исследований. Примерно до 1960 г. увеличение потока нейтронов происходило в той же степени, что и увеличение мощности реакторов, затем дальнейшее увеличение потока нейтронов стало опережать увеличение мощности реакторов. Это опережение начало проявляться особенно с начала 70-х годов, когда стали эффективно использоваться реакторы третьего поколения, такие как HFR в ILL (Гренобль, Франция), ОРПНН в LLB (Сакле, Франция), ИР-8 в Российском научном центре «Курчатовский институт» (Москва, Россия), ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (Дубна, Россия) и др.

В настоящее время в мире работает около пятидесяти исследовательских реакторов, на которых проводятся пучковые исследования. При этом большинство из них — это реакторы, проработавшие более 30 лет, что близко к естественному времени жизни реактора, т.е. большинство реакторов нуждаются в модернизации или замене на новые.

В конечном счете эффективность работы реактора определяется работой экспериментальных установок. В табл. 1 приведены примеры реакторов третьего поколения и частично второго, ориентированных в основном на пучковые исследования [8]. Измерительные приборы делятся согласно общепринятой классификации на пять типов: дифрактометры для упругого и диффузного упругого рассеяния, установки для малоуглового рассеяния, рефлектометры, спектрометры для неупругого и обратного рассеяния и специальные приборы. Последние включают в себя все, что не входит в предыдущие четыре категории. Установки для облучений и активационного анализа здесь не рассматриваются.

Как видно из этой таблицы, наиболее эффективными по всем показателям являются реактор HFR среди реакторов высокой мощности и реактор ORPHEE — среди реакторов средней мощности. Реактор HFR имеет наибольший абсолютный и удельный (приведенный к мощности) поток нейтронов и наиболее развитую инфраструктуру для проведения экспериментов. Организация работы ILL может служить хорошим примером международного сотрудничества. Кстати говоря, одна из основных причин успеха ILL состоит в том, что в этом институте каждые 10—12 лет обновляются измерительные приборы, что, хотя и требует больших затрат, обеспечивает высокий уровень исследований. Реактор ORPHEE, так же, как и реактор ИР-8, является, по-видимому, оптимальным для реакторов средней мощности и может служить хорошим примером организации работы национального центра.

Кроме технических характеристик, весьма существенным показателем является стоимость. Стоимость реактора в значительной мере определяется его средней мощностью, поэтому условной характеристикой, определяющей стоимость производимого нейтрона, можно считать отношение средней мощности к плотности потока. Чем больше на реакторе число экспериментальных установок, тем выше эффективность его использования. Можно сказать, тем дешевле один произведенный нейтрон. Из табл. 1 видно, что из всех реакторов выделяются реакторы HFR ILL и ORPHEE LLB. Реактор ИБР-2 за счет низкой средней мощности заметно превосходит все реакторы, но, поскольку он является импульсным источником, требует отдельного рассмотрения.

В целом, несмотря на весьма развившиеся в последние годы средства повышения эффективности использования реакторов — замедлители, нейтронно-проводные системы, современные спектрометры, число современных реакторов для физических исследований в мире явно недостаточно для удовлетворения все возрастающих потребностей физиков, биологов, химиков и материаловедов.

Таблица 1. Высокопоточные исследовательские реакторы и используемые приборы для экспериментов по рассеянию

Страна	Реактор	Место нахождения	Год создания	Мощность, МВт	Поток нейтронов, $\times 10^{14}$ н/см ² /с	Нейтронные каналы	Замедлители X - холодный Г - горячий	Приборы для рассеяния нейтронов				Полное число	
								Дифр.	МУРН	Реф-лект.	Неупр. Спец. ин-струм.		
Канада	NRU	Чок-Ривер	1957	125	3	6	X	3	1	0	2	0	6
Дания	DR-3	Рисо	1960	10	1,5	4	X	1	1	0	5	0	7
Франция	SILOE	Гренобль	1962/87	35	4	3	X	4	0	0	2	0	6
Франция	HFR-ILL	Гренобль	1971/95	58	15	26	2X,Г	11	2	0	10	2	25
Франция	ORPHEE	Сакле	1980	14	2,5	20	2X,Г	10	4	1	7	0	22
Германия	FRJ-2	Юлих	1962/72	23	2	8	X	4	3	1	7	3	18
Германия	BER-II	Берлин	1973/91	10	1	9	X	6	1	1	5	1	14
Венгрия	WWR	Будапешт	1992	10	1	8	—	2	1	1	3	3	10
Индия	Dhruva	Бомбей	1985	100	2	13	X	3	1	0	8	1	13
Япония	JRR-3M	Ибаракки	1990	20	2	26	X	4	1	0	10	5	20
Нидерланды	HFR	Петтен	1961/70	45	1	12	—	3	1	0	2	1	7
Россия	ВВР-М	Гатчина	1959	16	1	14	—	3	2	0	1	6	12
Россия	ИР-8	Москва	1981	8	1	12	X	2	0	0	3	5	10
Россия	ИБВ-2М	Екатеринбург	1966/83	15	2	6	—	4	1	0	1	0	6
Россия	ИБР-2 (импульсный)	Дубна	1984	2/150 0	0,1/100	14	X	6	1	2	4	1	14
Швеция	R-2	Студсвик	1960	50	4	8	X	6	0	0	2	0	8
США	HFBR	Брукхэйвен	1965	60	9	9	X	3	3	1	6	2	15
США	HFIR	Ок-Ридж	1966	100	30	4	—	4	1	0	5	0	10
США	MURR	Миссури	1966	10	1,2	6	—	3	2	1	2	6	14
США	NBSR	Гайтсбург	1969	20	4	5	X	2	0	0	6	1	9

ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ

История импульсных реакторов берет свое начало с 1945 года, со времен Манхэттенского проекта. Выделяют три типа импульсных реакторов [9]: импульсные реакторы самогасящего действия (ИРСД), импульсные реакторы периодического действия (пульсирующие реакторы) и бустеры.

Наиболее распространены реакторы первого типа, которые используют главным образом для радиационных исследований по причине возможно-го огромного пикового потока. В систематических пучковых исследованиях такие реакторы из-за аperiodичности импульсов и, соответственно, низкого среднего потока, используются редко. В качестве примера использования сверхмощного ИРСД можно привести готовящийся эксперимент по измерению времени жизни нейтрона на установке для ультрахолодных нейтронов с рекордной плотностью до 10^4 н/см³ на реакторе БИГР во ВНИИЭФ (Арзамас-16, Россия). Для сравнения, на источнике LL она достигла 10^2 н/см³. Установка создается группой из ЛНФ им.И.М.Франка совместно с физиками ВНИИЭФ.

Широкое распространение получили реакторы типа TRIGA, которые имеют большой, практически мгновенный отрицательный температурный коэффициент, что обеспечивает высокую степень безопасности. Первый реактор TRIGA I начал работать в 1958 г. в США, в настоящее время таких реакторов в мире 65 и используются они главным образом в режиме непрерывного действия, а также в учебных целях.

Идея импульсного реактора периодического действия была предложена в 1955 г. [3,4]. Реактор начал сооружаться в Дубне в 1957 году под руководством Д.И.Блохинцева и был введен в эксплуатацию 23 июня 1960 г. на средней мощности 1 кВт [5,6]. Это был первый в мире реактор, в котором импульсы генерировались периодически с частотой 5 и 50 Гц за счет вращения части активной зоны. В 1969 г. мощность реактора была доведена до 25 кВт. Установка получила название ИБР-30. В ИБР-30 подвижная часть зоны была разделена на две части для уменьшения тепловой нагрузки. С 1986 г. ИБР-30 работает как фотоядерный источник с размножающей мишенью (бустер) со средней мощностью 10 кВт и выходом нейтронов в импульсе при длительности импульса 4 мкс. Дальнейшее его развитие будет рассмотрено в следующем разделе.

Успешная работа реактора ИБР и его модификаций стимулировала появление в середине 60-х годов нескольких новых проектов. Первым было сообщение о пульсирующем реакторе SORA с подвижным отражателем и средней мощностью 1 МВт [10]. Реактор планировалось построить в исследовательском центре Евроатома в Испре (Италия). Мощный импульсный реактор периодического действия со средней мощностью до 30 МВт планировалось построить в Брукхэйвенской национальной лаборатории (США)

[11]. В 1964 г. началась работа в Дубне над проектом нового реактора ИБР-2. Принципиальным отличием ИБР-2 от серии реакторов ИБР стала модуляция реактивности подвижным отражателем, а также охлаждение активной зоны жидким натрием [12]. Из всех предложений новых высокопоточных пульсирующих реакторов был реализован только проект реактора ИБР-2, что стало возможным благодаря опыту работ с такими системами в Дубне и Обнинске, а также поддержке Министерства среднего машиностроения СССР.

Официально работы были начаты по проекту ИБР-2 в 1966 г., строительные — в 1969 г. Первая критическая сборка произведена в ФЭИ в 1968 г., в период с 1970 по 1975 гг. проведены исследования макета подвижного отражателя на стенде в Дубне. Физический пуск реактора (без теплоносителя) произошел через 8 лет после начала строительства — в конце 1977 — начале 1978 г. Затем началась подготовка и проведение энергетического пуска (с натрием), который фактически завершился 9 апреля 1982 г. выходом на среднюю мощность 2 МВт при частоте импульсов 25 Гц и проведением первых физических экспериментов на выведенных пучках. Официально реактор был принят в эксплуатацию 10 февраля 1984 г., программа физических экспериментов была начата 9 апреля 1984 г., после выхода на мощность 2 МВт при частоте импульсов 5 Гц. Как видно из приведенного графика работ, время запуска (освоения реактора) было близко к времени, затраченному на его фактическое создание, что, по-видимому, было оправдано новизной и необычностью выполняемой задачи.

На рис.1 показана фотография зданий реактора ИБР-2 и установки ИБР-30, на рис.2 — реакторный зал ИБР-2.

Принципиальная схема реактора ИБР-2 приведена на рис.3. Активная зона реактора объемом 22 л содержит 82 кг двуокиси плутония. Модуляция реактивности осуществляется стальным подвижным отражателем, состоящим из двух вращающихся с разными скоростями (1500 и 300 об/мин) частей (рис.4). Когда обе части отражателя проходят зону, генерируется импульс мощности (1500 МВт). При регулярном режиме работы реактора — 2500 часов в год на эксперимент — срок работы зоны без замены топлива составляет не менее 20 лет, 5—7 лет — срок эксплуатации подвижного отражателя. С 27 марта 1995 г. реактор ИБР-2 начал работать с новым (третьим по счету) подвижным отражателем (рис.5), ресурс которого определен в 7 лет. Через 7 лет в 2002 г. потребуется и замена активной зоны.

Таким образом, реактор ИБР-2 является очень дешевой и экономичной и, как показал опыт более чем 10-летней работы, простой и безопасной в эксплуатации машиной. Создание реактора ИБР-2 обошлось примерно в 20 млн.руб. (в ценах 1984 г.). Сегодня эксплуатация реактора, включая программу его развития и заработную плату всего обслуживающего персонала, стоит чуть больше 1 млн. долларов США в год. При своей относитель-

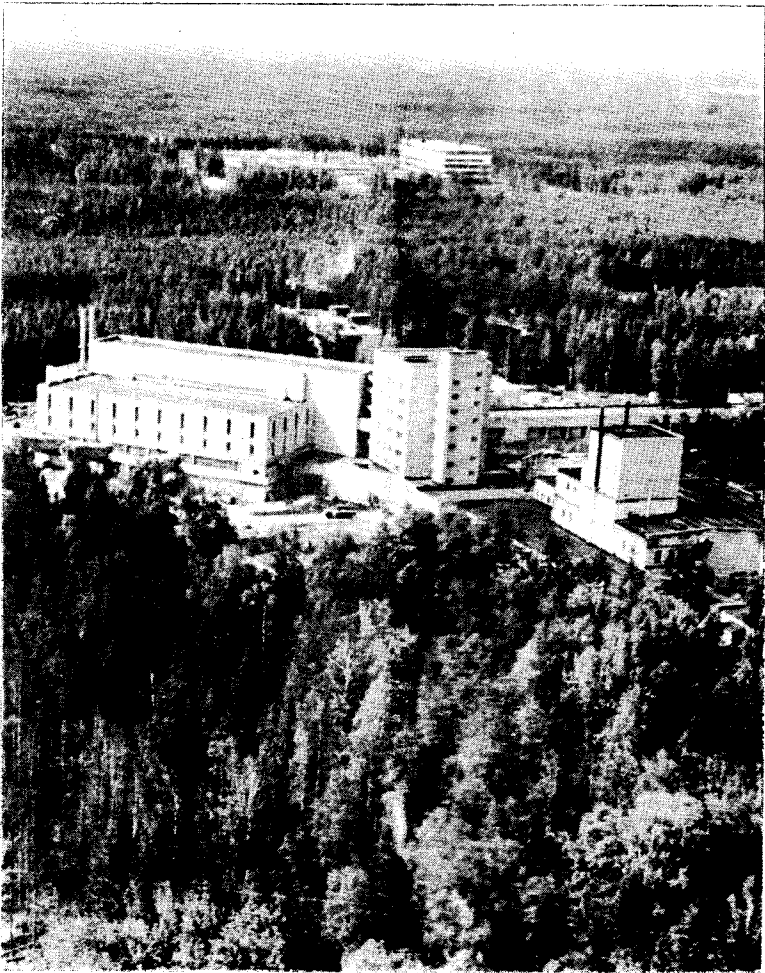


Рис.1. Общий вид зданий установки ИБР-30 и реактора ИБР-2

ной дешевизне реактор дает в импульсе рекордный для исследовательских источников нейтронов поток, равный 10^{16} н/см²·с.

За время работы реактора ИБР-2 вокруг него сформировался комплекс спектрометров, позволяющий проводить на современном уровне исследования с рассеянием нейтронов по всем актуальным проблемам физики конденсированных сред, химии, биологии, материаловедения. На рис.6 показан общий вид экспериментального зала реактора. Более подробная инфор-

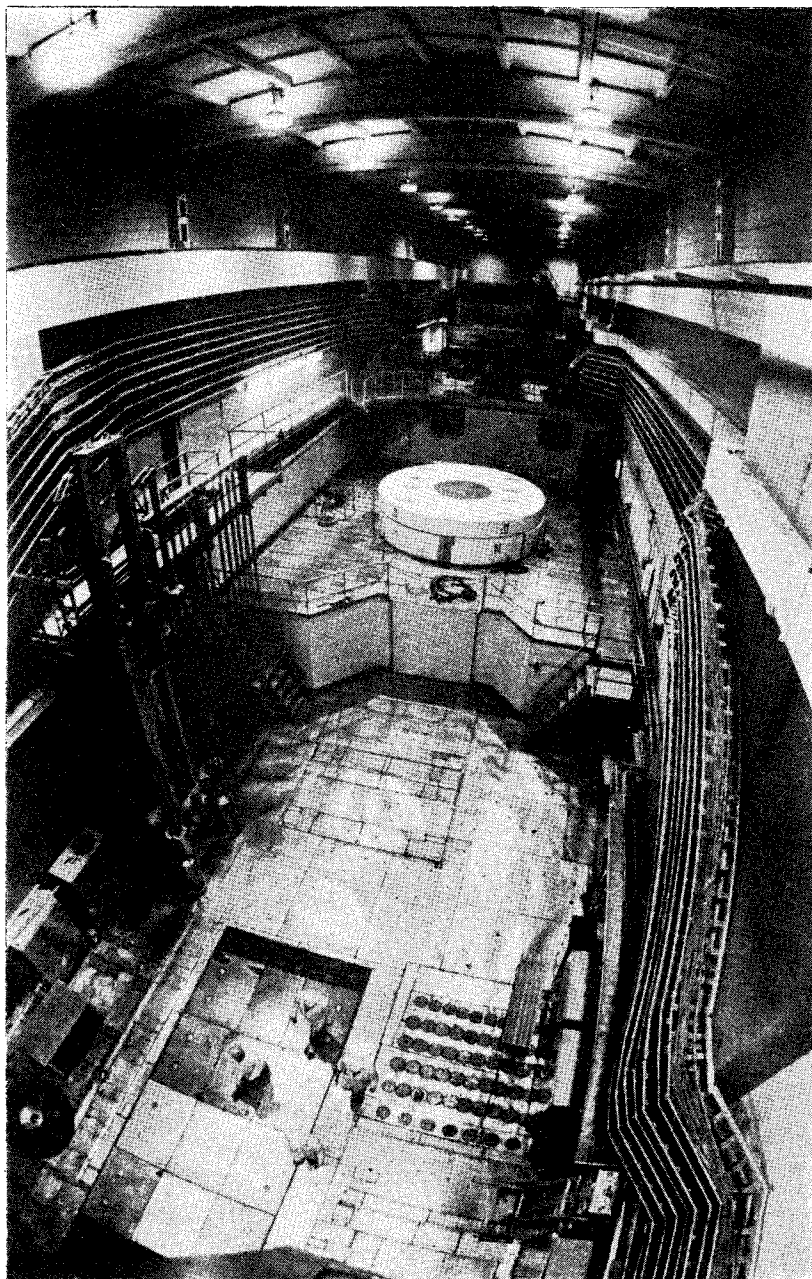


Рис.2. Общий вид реакторного зала ИБР-2

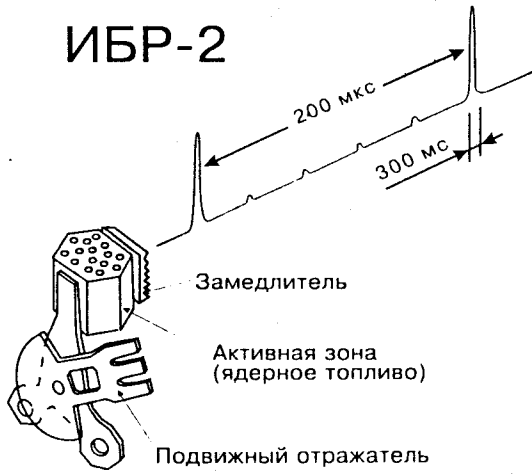


Рис.3. Принципиальная схема реактора ИБР-2

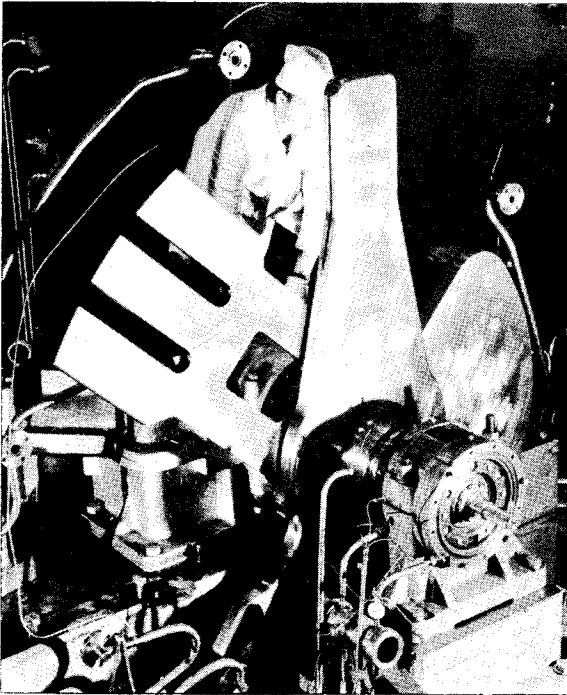


Рис.4. Подвижный отражатель реактора ИБР-2

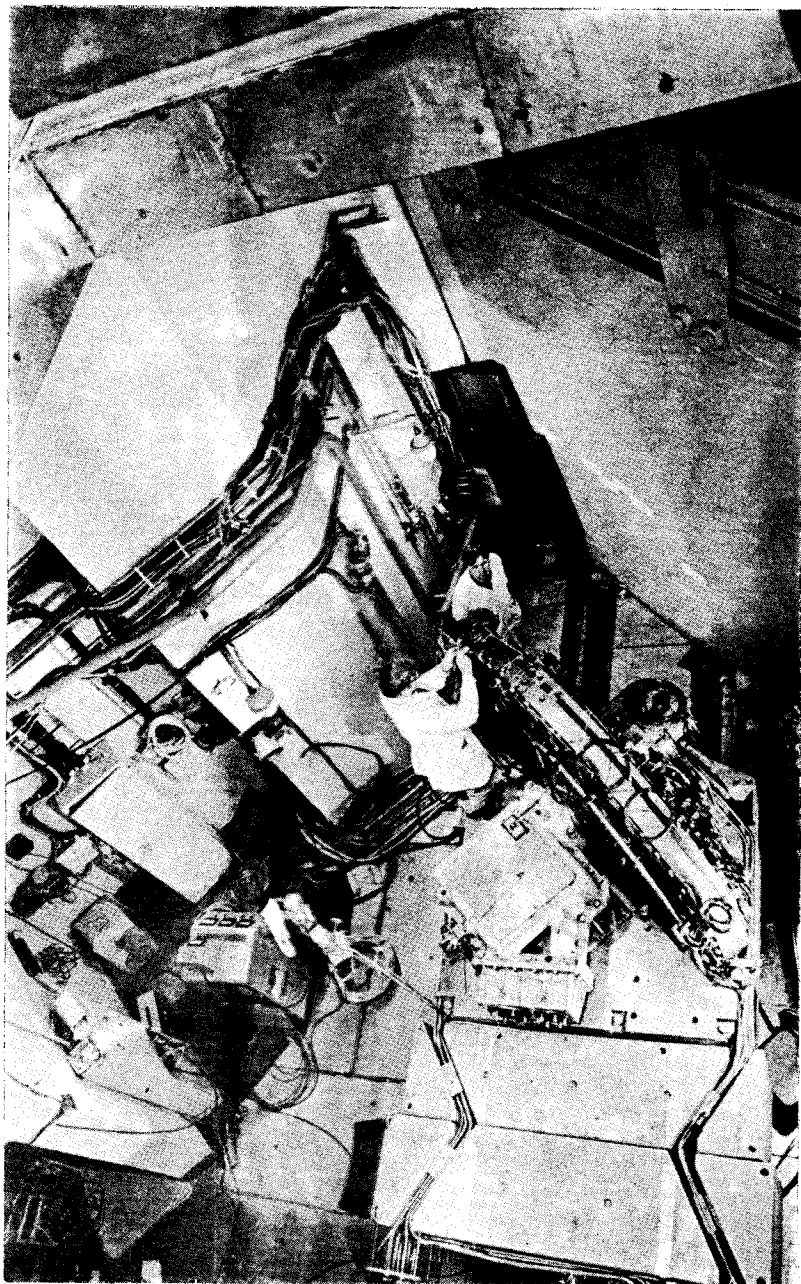


Рис.5. Новый подвижный отражатель в кожухе у активной зоны реактора

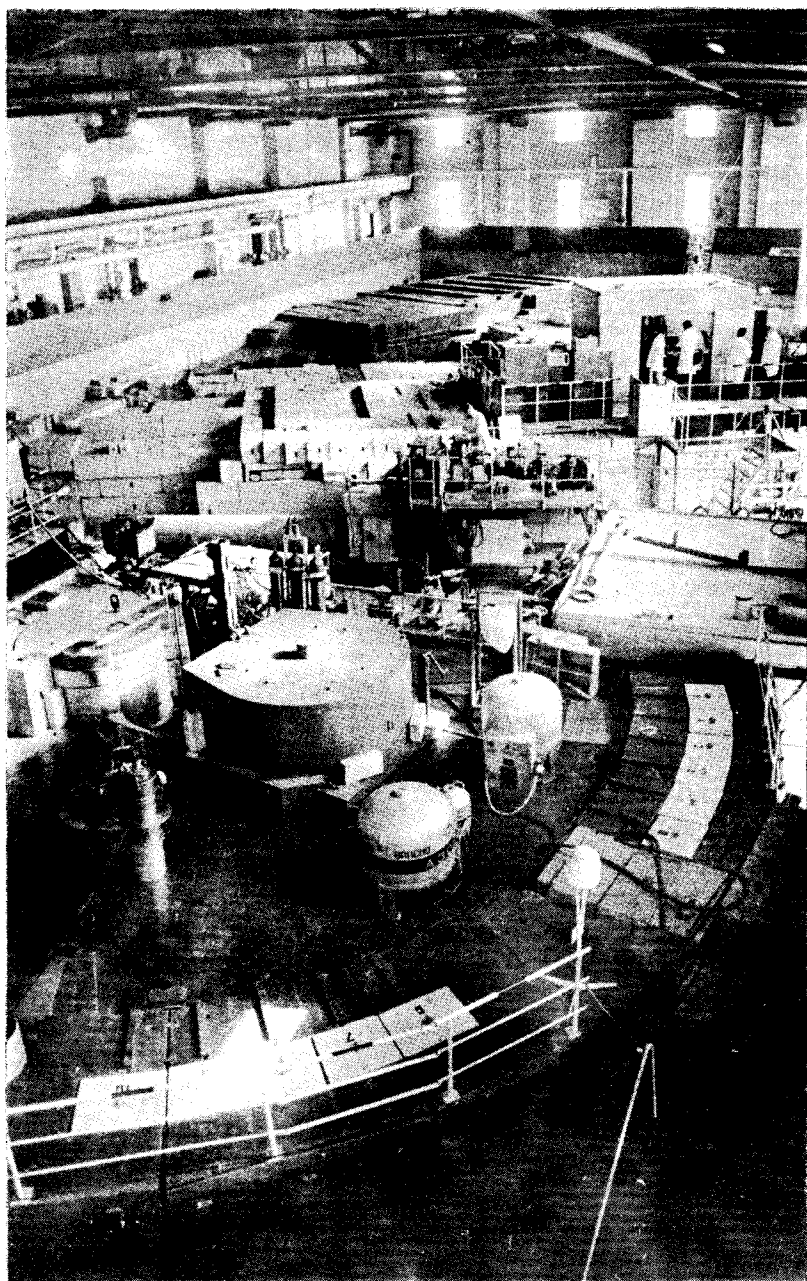


Рис.6. Общий вид экспериментального зала реактора ИБР-2

мация о параметрах и возможностях спектрометров, приведена в публикациях [13,14], буклетах для пользователей и годовых отчетах ЛНФ им.И.М.Франка.

Имея самый высокий в мире поток тепловых нейтронов в импульсе, реактор ИБР-2 уступает испарительным источникам нейтронов по ширине импульса (300 мкс по сравнению с 10-13 мкс), что часто отмечают в качестве недостатка пульсирующего реактора, поскольку эта характеристика источника влияет на разрешающую способность измерительных приборов. Этот важный вопрос требует специального рассмотрения.

В экспериментах по рассеянию нейтронов измеряют дважды дифференциальное сечение рассеяния в элемент телесного угла $d\Omega$:

$$\frac{d^2\sigma}{d\omega d\Omega} = \frac{k_1}{k_0} S(Q, \omega),$$

где $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_1$ — волновые векторы падающего и рассеянного нейтрона, $\hbar\omega = (\hbar^2/2m)(k_0^2 - k_1^2)$ — переданная энергия, $\mathbf{Q} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1$ — вектор рассеяния. Волновой вектор связан с длиной волны нейтрона соотношением $|\mathbf{k}| = k = 2\pi/\lambda$. При использовании импульсных источников нейтронов измеряется время пролета нейтрона t на расстоянии от источника до образца L_0 и от образца до детектора L_1 , при этом используется соотношение $\lambda h/mv = 0,4/v = 0,4t/L$. Вся информация о свойствах образца содержится в функции рассеяния $S(Q, \omega)$.

Точность измерений (разрешение приборов) зависит от точности измерения переданных энергии и импульса, которая, в свою очередь, зависит от типа эксперимента. По типу приборов и характеру получаемой информации выделяют четыре основных вида экспериментов по рассеянию нейтронов: дифракция, малоугловое рассеяние, отражение от поверхности и неупругое рассеяние. В каждом из этих экспериментов точность измерения определяется разными зависимостями [15]. При этом надо иметь в виду, что приведенная классификация является очень укрупненной, в рамках каждого вида имеется много разновидностей постановки эксперимента. Ниже мы приведем зависимости точности измерения для разных видов эксперимента, которые надо воспринимать лишь как качественно-иллюстративные.

Дифракция:

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx \left[\left(\frac{\Delta t_m}{t} \right)^2 + \frac{\Delta L}{L} + (\text{ctg } \theta \cdot \Delta \theta)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где Δt_m — временная полуширина нейтронного импульса после замедлителя, θ — угол рассеяния.

Малоугловое рассеяние:

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx \left[\left(\frac{\Delta \theta}{\theta} \right)^2 + \frac{\delta_m^2}{(L_0 + L_1)^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где δ_m — эффективное расстояние.

Рефлектометрия:

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx \text{ctg } \theta \cdot \Delta \theta \approx \frac{\Delta \theta}{\theta}. \quad (3)$$

Неупругое рассеяние в обратной геометрии:

$$\frac{\Delta \hbar \omega}{E_0} \approx 2 \left[\left(\frac{\Delta t_m}{t} \right)^2 + \left[\frac{E_1}{E_0} \text{ctg } \theta \cdot \Delta \theta \left(1 + \frac{L_1}{L_0} \left(\frac{E_0}{E_1} \right) \right) \right]^{3/2} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Из этих формул видно, что шириной нейтронного импульса определяется разрешение в экспериментах по дифракции и неупругому рассеянию, и здесь исходные условия на реакторе ИБР-2 уступают таковым на испарительных источниках.

Однако развитие техники эксперимента на реакторе ИБР-2 показывает, что создание современных приборов позволяет получить разрешение на уровне лучших импульсных источников как для упругого, так и для неупругого рассеяния. В подтверждение можно привести результаты измерений упругого [16] (рис.7) и неупругого [17] (рис.8) рассеяния, проведенные на одних и тех же образцах на ИБР-2 и ISIS — одном из лучших среди испарительных источников (Лаборатория им.Резерфорда — Апплетона, Великобритания). Для малоуглового рассеяния и рефлектометрии ширина нейтронного импульса не является определяющей.

Особенно важным было создание фурье-дифрактометра высокого разрешения (ФДВР) [16], поскольку дифрактометрия является наиболее продуктивным направлением использования импульсных источников. В настоящее время в мире имеется четыре прибора такого класса — это HRPD на ISIS (Великобритания), D2B на HFR (Франция), HRNPD на HFBR (США) и ФДВР на ИБР-2.

Основная информация об экспериментах по рассеянию на реакторе ИБР-2 суммирована в табл.2.

Поток нейтронов, получаемых от реактора, существенным образом зависит от замедлителя нейтронов. Обычно в реакторах в качестве замедлителей используется вода, что дает максимум выхода нейтронов с тепловой энергией. Для расширения диапазона энергий нейтронов, следовательно, диапазона изучаемых явлений, используют специальные устройства, распо-

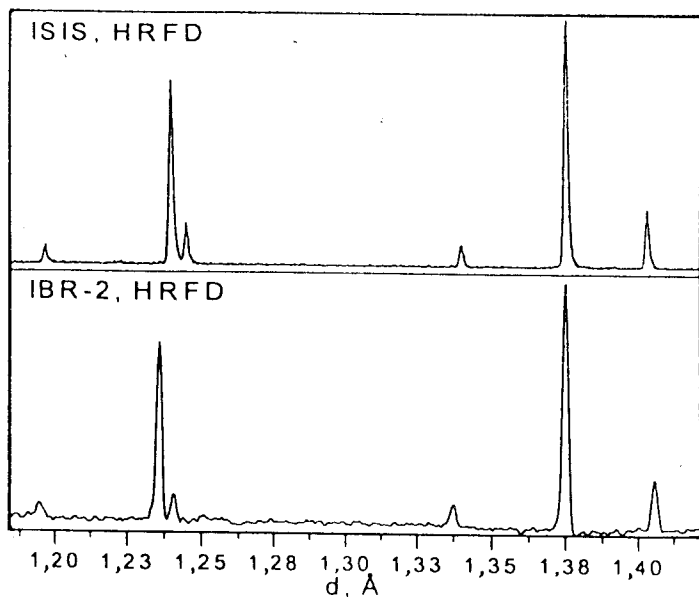


Рис.7. Часть дифрактограммы стандартного образца Al_2O_3 , измеренной на дифрактометрах HRPD на ISIS (вверху) и ФДВР на ИБР-2 (внизу)

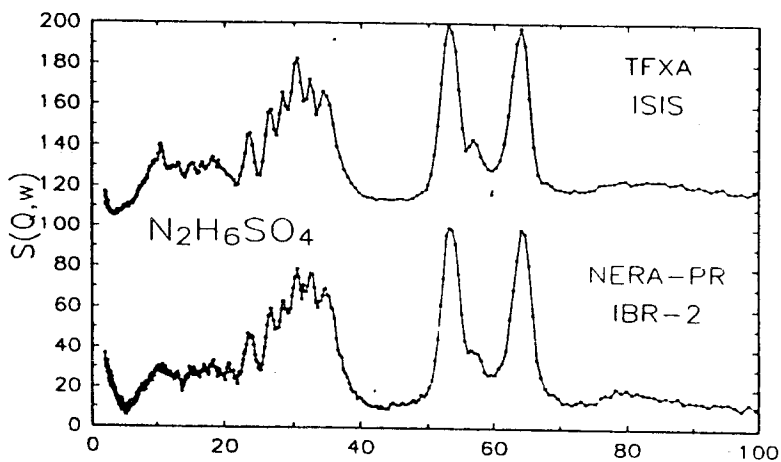


Рис.8. Спектры высокого разрешения при рассеянии на сульфате гидро-
зина, измеренные на спектрометрах TFXA (ISIS) и НЕРА-ПР (ИБР-2)

Таблица 2. Основные параметры установок для экспериментов по рассеянию нейтронов на реакторе ИБР-2

Виды рассеяния, направления исследований	Разрешение спектрометра	Средний поток нейтронов на образце
Упругое Прецизионный анализ структуры поли- и монокристаллов. Изменения структуры под действием температуры, внешнего давления, электрических и магнитных полей	Дифрактометры ФДВР, ДН-2, ДН-12, СНИМ-2, НСВР $\Delta d/d$ до 10^{-3}	до 10^7 н/см ² /с, диапазон длин волн нейтронов λ : $0,8 \pm 20 \text{ \AA}$
Малоугловое Надатомные структуры масштаба от 10 до 300 Å	Спектрометр ЮМО $\Delta Q/Q$ до $4 \cdot 10^{-2}$	до $4 \cdot 10^7$ н/см ² /с, диапазон λ : $0,7 \pm 17 \text{ \AA}$
Неупругое Динамика кристаллов, полиморфных материалов, классических и квантовых жидкостей	Спектрометры НЕРА, КДСОГ-М, ДИН-2ПИ, ДИН-2ПП $\Delta E/E$ до 10^{-2}	до $7 \cdot 10^6$ н/см ² /с, интервал передач энергии 0 ± 300 мэВ
Отражение от поверхности Поверхности немагнитных и магнитных пленок, границы раздела фаз	Рефлектометры СПН-1, РЕФЛЕКС-1, РЕФЛЕКС-2 $\Delta\theta/\theta \leq 3 \cdot 10^{-2}$ поляризация пучка до 96%	до 10^6 н/см ² /с, диапазон λ : $0,7 \pm 10 \text{ \AA}$

лагаемые вблизи активной зоны реактора и называемые холодным и горячим замедлителями, которые увеличивают долю холодных или надтепловых нейтронов соответственно. В последнее время особое распространение получили холодные замедлители в связи с возросшим интересом к длинно-периодным структурам и медленным процессам в конденсированных средах.

На реакторе ИБР-2 в 1994 г. закончились испытания модели метанового холодного замедлителя. Эксперименты показывают, что выход длинноволновых нейтронов увеличивается больше чем в 10 раз. В настоящее время с учетом полученных результатов проектируется штатный вариант замедлителя с двумя режимами работы при 20 К (метан в твердой фазе) и при 70 К (метан в жидкой фазе). Замедлитель будет установлен на реакторе в конце 1996 г.

Следует заметить, что в силу большого потока нейтронов на реакторе ИБР-2 имеется относительно большая доля холодных нейтронов, что создает лучшие, чем на других источниках, условия для соответствующих экспериментов по дифракции, малоугловому рассеянию и рефлектометрии. Наличие холодного замедлителя, конечно, улучшает эти условия.

Возможности пульсирующих реакторов далеко не исчерпываются параметрами реактора ИБР-2. Опыт создания и эксплуатации таких реакторов в Дубне показывает, что подобная установка может быть спроектирована с лучшими, чем у ИБР-2, характеристиками, как нейтронно-физическими,

так и эксплуатационными [18]. Например, в настоящее время готов к реализации проект нового подвижного отражателя из никелевого сплава, у которого подвижные части будут вращаться навстречу друг другу и который позволит увеличить поток в два раза при уменьшении в полтора раза ширины импульса. В настоящее время уже начаты работы по программе модернизации реактора ИБР-2, проведение которой запланировано на 2002—2004 гг.

Таким образом, опыт эксплуатации реактора ИБР-2 показывает, что в распоряжении физиков имеются* дешевые, безопасные и эффективные импульсные источники нейтронов. Высокопоточный реактор ИБР-2 по своим возможностям весьма близок к испарительным источникам нейтронов и может служить хорошим к ним дополнением. Более того, опыт работы реактора ИБР-2 показывает, что ширина нейтронного импульса не является столь критичным параметром в достижении качества источника и ею вполне можно пожертвовать для достижения более высокого потока. Общий вывод состоит в том, что импульсные источники нейтронов с большой шириной импульса могут оказаться наиболее перспективными ввиду их высокопоточности и относительной дешевизны. К таким источникам мы относим пульсирующие реакторы типа ИБР и испарительные источники на базе линейных протонных ускорителей.

БУСТЕРЫ

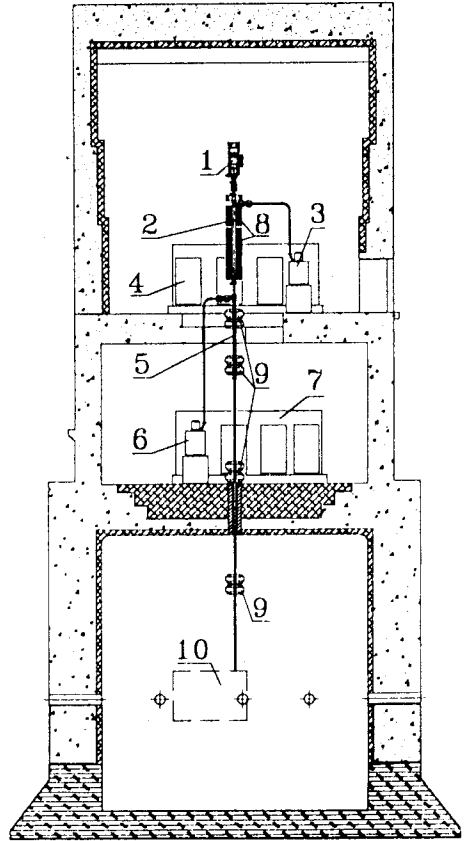
В предыдущем разделе было показано, что ширина нейтронного импульса источника, которая служит важной его характеристикой, не является определяющим параметром при проведении большинства экспериментов по физике конденсированных сред, если источник обладает достаточно высокой интенсивностью. Иная ситуация для экспериментов по ядерной физике, где используются нейтроны больших энергий $E > 1$ эВ и где «качество» источника, хотя и грубо, но вполне адекватно, может быть охарактеризовано параметром [9,15]:

$$n(E) \sim \Phi(E)/(\Delta t)^m, \quad (5)$$

где $n(E)$ — интенсивность регистрации нейтронов при заданной неопределенности ΔE в энергии, $\Phi(E)$ — поток нейтронов в интервале энергии ΔE , Δt — неопределенность времени пролета нейтронов, которая зависит, главным образом, от длительности импульса источника (после замедлителя), показатель степени $m \geq 1$ в зависимости от типа эксперимента.

Поскольку для нейтронов с $E \geq 1$ эВ неопределенность их миграции в водяном замедлителе $\Delta t = 1,2/\sqrt{E} \leq 1$ мкс, то понятно, что источник нейтронов типа ИБР, который давал длительность вспышки до замедлителя ~ 50 мкс, не был оптимальным для ядерной физики. Поэтому вскоре после

Рис.9. Схема установки ИРЕН: 1 — источник электронов (пушка); 2 — ускоряющие секции; 3, 6 — клистроны SLAC 5045; 4, 7 — модуляторы клистронов; 5 — электропроводы (канал транспортировки электронов); 8 — соленоиды фокусирующей системы; 9 — корректирующие квадрупольные линзы; 10 — размножающая мишень



пуска реактора ИБР было решено [6] использовать идею бустеров, предложенную и реализованную в Харуэлле (Великобритания) в 1959 г. [19].

С 1964 г. реактор ИБР начал использоваться как фотоядерный супербустер в комплексе с электронным ускорителем, в котором реактор играл роль размножающей мишени, которая, в свою очередь, имела модуляцию реактивности. В конце 60-х — начале 70-х годов было опубликовано несколько проектов супербустеров [20], но, насколько нам известно, ни один из них не был реализован.

До 1986 г. установка ИБР-30 могла работать в двух режимах — как пульсирующий реактор и как супербустер. В 1986 г. реакторный режим был прекращен. Поскольку временной ресурс активной зоны заканчивается в 1999 г., то был предложен проект нового источника нейтронов — источника резонансных нейтронов ИРЕН [21]. Именно эта область энергий нейтронов от $5 \cdot 10^{-1}$ до 10^4 эВ представляет наибольший интерес для нейтронной ядерной физики. С учетом общей экономической ситуации в проекте сделана попытка оптимизации параметров источника и затрат на его создание.

Главным ограничивающим параметром была необходимость сохранения существующих зданий и разводки пучков для физических установок. Поэтому полностью сохранена схема установки (рис.9) и нейтронных пучков (рис.10). ИРЕН является специализированным источником для исследований по ядерной физике с резонансными нейтронами, поэтому оптималь-

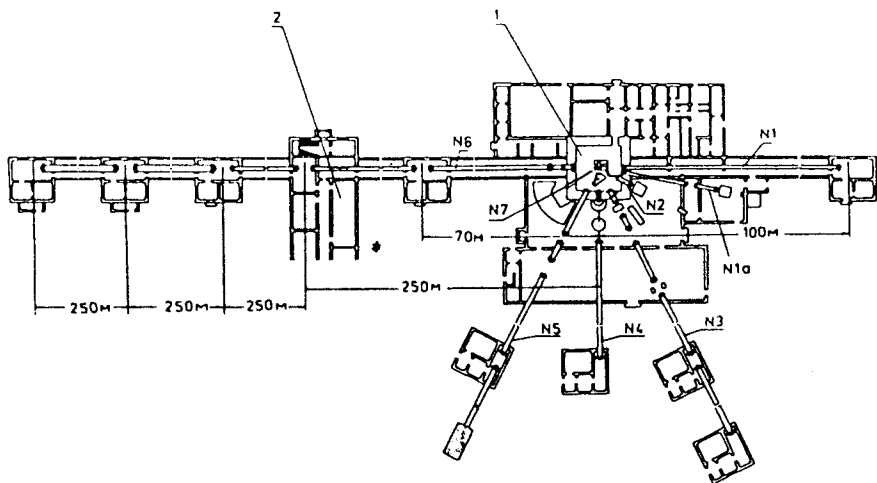


Рис.10. Схема нейтронных пучков на установке ИРЕН: 1 — зал вывода пучка электронов и мишени; 2 — лабораторный корпус № 44; N1÷N7 — номера нейтронных каналов

ной длительностью нейтронного импульса может быть величина порядка 0,5 мкс (ИБР-30 имеет 4 мкс). Для увеличения потока нейтронов используется размножающая мишень из металлического плутония. Особые требования предъявляются к ускорителю электронов.

На рис.11 показана зависимость выхода фотонейтронов от энергии электронов на единицу мощности ускорителя. Видно, что при энергии порядка 100 МэВ кривая выходит на насыщение. Поэтому было решено использовать ускоритель с энергией до 200 МэВ. Такой ускоритель проектируется в ИЯФ СО РАН в Новосибирске.

Оптимизированные по всем условиям параметры ИРЕН приведены в табл.3. В настоящее время в мире для ядерной физики работает несколько источников нейтронов, основные из них приведены в табл.4 для сравнения с ИРЕН. Кроме источника LANSCE на Лос-Аламосской мезонной фабрике, остальные источники базируются на линейных электронных ускорителях. В табл.4 приведены интегральные интенсивности $I_n \left[\frac{n}{c} \right]$ и коэффициент C из выражения

$$\Phi(E,L) = \frac{C}{EL^2},$$

которое характеризует поток нейтронов Φ с энергией E [эВ] на расстоянии L [м] от источника на площади 1 см^2 . Кроме того, приведены

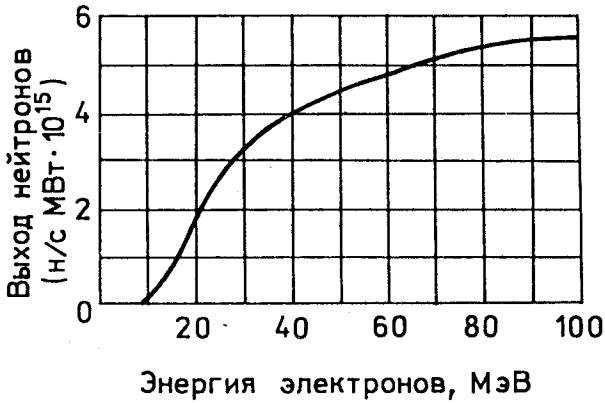


Рис.11. Зависимость выхода фотонейтронов от энергии электронов на единицу мощности

Таблица 3. Основные параметры ИРЕН

Ускоритель		Размножающая мишень	
Энергия электронов, МэВ	200	Размножение	30
Импульсный ток, А	1,5	Ширина импульса, мкс	0,4
Ширина импульса, мкс	0,25	Средняя интенсивность нейтронов, с ⁻¹	1,5 · 10 ¹⁵
Частота повторений, Гц	150	Объем активной зоны, дм ³	2,5
Средняя мощность, кВт	12		

Таблица 4. Параметры наиболее интенсивных импульсных источников нейтронов для ядерной физики

Источник	$\langle I_n \rangle \cdot 10^{-15}$	$C \cdot 10^{-7}$	τ , мкс	Δt (100 эВ), мкс
ФАКЕЛ (РНЦ КИ, Россия)	0,03	0,1	0,05	0,2
ORELA (ORNL, USA)	0,13	1,5	0,03	0,18
ЛУЭ-40/ИБР-30 (Дубна)	0,5	2,7	4,00	4,1
LANSCCE (LANL, USA)	10	40	0,150	0,3
ИРЕН (Дубна, проект)	1,0	5	0,4	0,43

длительности нейтронного импульса быстрых нейтронов (до замедления) и длительности импульсов нейтронов, замедленных до 100 эВ.

Из табл.4 видно, что ИРЕН уступает по возможностям только самому высокопоточному источнику для ядерной физики — LANSCE. Однако, если учесть, что стоимость ИРЕН составляет около 5 млн. долларов США, а годовая эксплуатация составит около 0,5 млн. долларов США, то можно утверждать, что ИРЕН будет очень эффективным источником.

По-видимому, Дубна — единственное место в мире, где сооружается новый бустер на базе электронного ускорителя, да и вообще бустер. Поскольку бустеры дают повышение выхода нейтронов в 10—100 раз при практически тех же затратах на энергетику, то, конечно, их использование было бы эффективным на протонных ускорителях. Нам известен только один готовый для реализации проект бустера — это проект нейтронного источника на Московской мезонной фабрике в г.Троицке [22]. Главная причина состоит в том, что бустеры относятся к категории ядерных реакторов, против которых в последнее время активно выступает общественность многих стран. Нам представляется, что опыт Дубны убедительно показывает эффективность использования бустеров как дешевых и безопасных источников нейтронов для физических исследований. Несомненно, что этот опыт будет полезен и для решения проблем энергетики при разработке электроядерных источников энергии.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ В МИРЕ

Как показывает анализ [8], общее число реакторов в мире уменьшается, и эта тенденция сохранится в ближайшее время, поскольку большинство работающих реакторов уже приближается к естественному окончанию срока эксплуатации. Можно ожидать, что из существующих реакторов после 2005 г. сохранятся реакторы ОРПНН (Франция), DHRUVA (Индия), BER-2 (Германия), JRR-3M (Япония), BRR (Венгрия), HFR (Франция), MARIA (Польша), ИБР-2 (Россия). Из них шесть расположены в Европе и два в Азии.

В Европе в начале этого года начал функционировать после ремонта реактор HFR (ILL). Он сохранит свои лидирующие позиции как международный центр еще лет 20. В следующем году, по-видимому, начнут работать нейтронные источники испарительного типа с постоянным потоком SINQ в PSI (Вилиген, Швейцария [23]) и импульсный источник на линейном протонном ускорителе Московской мезонной фабрики (Институт ядерных исследований РАН, Троицк, Россия). В 1998 г. должен начать работать ИРЕН в Дубне. Улучшения параметров (повышение потока и уменьшение

ширины импульса) можно ожидать от запланированной модернизации реактора ИБР-2 в 2002—2004 гг. В более далекой перспективе можно рассчитывать на разрабатываемые в настоящее время европейские проекты импульсных источников испарительного типа AUSTRON и ESS.

Продолжается реализация проекта реактора ПИК в Гатчине (Россия) [24]. Это проект современного реактора третьего поколения, рассчитанного на мощность 100 МВт, поток нейтронов $4 \cdot 10^{15}$ н/см²·с, с двумя холодными и двумя горячими источниками, экспериментальными (около реактора) и нейтронноводами с общим возможным числом установок до 50. В настоящее время выполнено примерно 80% всех работ с учетом новых требований по безопасности, введенных в России после 1986 г. Реактор ПИК мог бы играть роль европейского нейтронного центра, учитывая его удобное расположение (40 км от Санкт-Петербурга со стороны международного аэропорта) и наличие высококвалифицированного и очень опытного коллектива ПИЯФ РАН.

Что касается реакторов средней мощности, то можно ожидать дальнейшего расширения международного сотрудничества на отмеченных выше реакторах с целью совершенствования их инфраструктуры и более эффективного использования. Из новых проектов весьма привлекательным является проект создания реактора на 20 МВт в Гархинге (Мюнхен, Германия), разработанный с учетом опыта реактора ОРПНН. Возможно, что вопрос о его создании решится в этом году.

В США имеется несколько предложений по созданию реактора типа HFR ILL и импульсного источника испарительного типа мощностью 1 и 5 МВт. Хотя все эти предложения находятся в стадии разработок, ясно, что в США в ближайшие годы должна начаться реализация новых проектов нейтронных источников, т.к. существующие реакторы были приняты в эксплуатацию в середине 60-х годов. После закрытия в начале этого года проекта суперреактора ANS в Ок-Ридже можно ожидать, что это будет протонный ускоритель, скорее всего, линейный без накопителя.

В Канаде преобладает концепция использования международных мегаустановок при наличии собственных одного-двух реакторов среднего класса. Рассматриваются два проекта: модернизация реактора MNR с увеличением мощности до 12 МВт, что будет стоить от 70 млн. до 120 млн. долл. США, и замена реактора NRU в Чок-Ривере на новый реактор с мощностью 20 МВт, что будет стоить 150—200 млн. долл. США.

В Азии нейтронные исследования в ближайшие годы будут в значительной мере концентрироваться на реакторах JRR-3M (Токаимури, Япония) и DHRUVA (Бомбей, Индия). Что касается новых проектов, то в Японии обсуждаются пока проекты источников на основе ускорителей.

В Австралии обсуждаются планы реконструкции существующего реактора и создания нового источника.

В Египте начаты работы по созданию нового исследовательского реактора мощностью 22 МВт в Организации атомной энергии в Каире.

Итак, наиболее подготовлена к переходу на следующий этап развития (после 2000 г.) реакторных источников нейтронов Европа, где в 70-80-е годы произошло существенное развитие как реакторной технологии, так и методики эксперимента. Хотя и здесь требуются значительные усилия для сохранения поступательного движения. Это связано не только с техническими и финансовыми трудностями. Большая проблема состоит в возросшей в последние годы боязни ядерных аварий и риска распространения ядерного оружия. Серьезную роль может сыграть введенное в США ограничение на обогащение ^{235}U до 20%. Поскольку США является одним из основных поставщиков ядерного топлива, то это ограничение автоматически ведет к снижению мощности и, следовательно, плотности потока нейтронов как на существующих реакторах, так и на будущих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нейтронов для физических исследований имеет настолько важное значение, что, несмотря на все трудности: возрастающая стоимость эксплуатации существующих, проектирования и строительства новых реакторов, ограничения на топливо, сопротивление «зеленого движения», оно находит все больше сторонников. Число пользователей нейтронных пучков, в том числе и реакторных, растет. Согласно данным, представленным на Совещании экспертов по источникам синхротронного излучения и нейтронным пучкам Форума меганаук, проведенном 29 ноября — 1 декабря 1993 г. в Ризо (Дания) Организацией экономической кооперации и развития [25], общее число пользователей оценивается только в странах Организации экономической кооперации и развития ~ 4000 в 1993 г. и, как ожидается, ~ 7000 в 2000 г. Таким образом, необходимость нейтронов для науки обуславливает необходимость иметь соответствующее число источников нейтронов.

Наиболее распространенными источниками нейтронов для физических исследований в настоящее время являются ядерные реакторы, и необходимость в них сохранится еще долго. Стремление уйти от возможных ядерных аварий обуславливает общую тенденцию к развитию испарительных источников на базе протонных ускорителей. С этой точки зрения, по-видимому, наиболее оптимальным является создание более дешевых, при наличии одного — двух крупных накопителей типа ESS, протонных бустеров, т.е. мощных линейных протонных ускорителей с размножающей мишенью. В этом смысле большое значение имеет опыт использования пульсирующих реакторов типа ИБР как в плане работы с размножающими мишенями, так

и в плане развития методики эксперимента на импульсном источнике с большой шириной нейтронного импульса.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что пульсирующие источники нейтронов в Дубне, созданные при активном участии Ф.Л.Шапи-ро, являются эффективными, экономичными и дешевыми устройствами, дают хорошие возможности для физических исследований с использованием нейтронов. Они играют важную роль в формировании идей и технических решений при создании новых источников нейтронов в мире. Все это служит объективным основанием для дальнейшего развития пульсирующего реактора ИБР-2 и электронного бустера как оригинальных современных источников нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Egelstaff P.A. — AEREN/M 60. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 1953.
2. Firk F.W.K — Nucl. Instr. and Meth., 1979, vol.162, p.539.
3. Зубарев Т.Н. — Атомная энергия, 1958, т.5, с.605.
4. Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. — Атомная энергия, 1959, т.7, с.417.
5. Блохин Г.Е., Блохинцев Д.И., Блюмкина Ю.А. и др. — Атомная энергия, 1961, т.10, с.437.
6. Франк И.М. — ЭЧАЯ, 1972, т.2, с.807.
7. Mc Reynolds A.W., Whitmore W.L. — Inelastic Scattering of Neutrons. IAEA, Vienna, 1961, p.421.
8. Aksenov V.L. — In: Large Facilities in Physics, ed. M.Jacob and H.Schopper, World Scientific, 1995, p.273; Preprint JINR D3-94-364, Dubna, 1994.
9. Шабалин Е.П. — Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
10. Raievski V. — In: Pulsed Neutron Research. Vienna, IAEA, 1965, vol.2, p.533.
11. Hendrie J.M., Hoffman K.C., Kouts H.J.C. et al. — Report BNL 13208, 1969, Brookhaven.
12. Ананьев В.Д., Блохинцев Д.И., Букаев П.В. и др. — Препринт ОИЯИ 13-4392, 1969, Дубна.
13. Belushkin A.V. — Neutron News, 1991, vol.2, p.14.
14. Aksenov V.L. — Physica B, 1991, vol.174, p.438.
15. Уиндзор К. — Рассеяние нейтронов от импульсных источников нейтронов. М.: Энергоиздат, 1985.
16. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Simkin V.G. et al. — In: Proc. of XII ICANS Meeting, Abingdon 1993, Reports of Rutherford Appleton Lab., RAL 94-025, 1994, vol.1, p.1-124.
17. Natkaniec I., Bragin S.I., Brankowski J., Mayer J. — *ibid.*, p.1-89.
18. Shabalin E.P., Rogov A.D. — In: Pulsed Nuclear Reactors: New Capabilities for Scientific Research, JINR Reports D3-92-76, Dubna, 1992, p.42.
19. Poole M., Wiblin E. — In: Proc. Int. Conf. on Peaceful Use of Atomic Energy. U.N., 1958, v.14, p.236.

20. **Шабалин Е.П.** — Атомная энергия, 1982, т.52, с.92.
21. **Aksenov V.L., Dikansky N.S., Lomidze V.L. et al.** — JINR Commun., E3-92-110, Dubna, 1992; Acta Phys. Hung., 1994, vol.75, p.341.
22. **Dementyev A.V., Miroshnichenko V.G., Mosievskaya I.Y. et. al.** — RAL-94-025, 1994, vol.II, p.T71.
23. **Bauer G.S., Thamm G.** — Physica B, 1991, vol.174, p.476.
24. **Okorokov A.I.** — ibid, p.443.
25. **Riste T.** — Analytical Report of the OECD Megascience Forum Experts Meeting on Synchrotron Radiation Sources and Neutron Beams (29 November — 1 December 1993, Riso, Denmark). DSTI/STP/MS (94) 2.