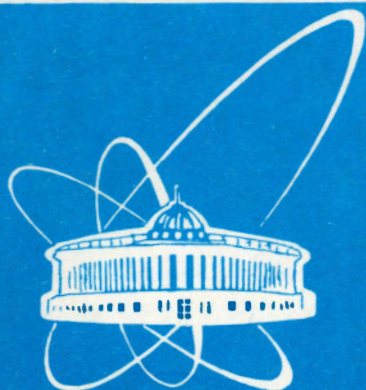


94-364



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

ДЗ-94-364

В.Л.Аксенов

## РЕАКТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Доклад на 5-й Международной конференции  
Европейского физического общества  
«Большие установки в физике»,  
Лозанна, Швейцария, 12—14 сентября 1994 г.

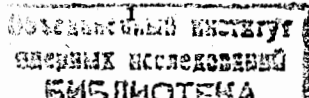
1994

## 1. Введение

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 использования для 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.

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. Особенно большое распространение получили нейтронные исследования в области физики конденсированных сред. В настоящее время диапазон доступных для исследований переданных энергий составляет от 100 нэВ до десятков эВ, а переданных моментов импульсов от  $10^{-4} \text{ \AA}^{-1}$  до  $10^2 \text{ \AA}^{-1}$ . Возможность изменения данных параметров в интервале шести порядков позволяет проводить исследования фундаментальных взаимодействий, свойств твердых тел и жидкостей, биологических объектов, химических реакций. За последние два десятка лет был получен целый ряд новых научных результатов, недоступных для получения другими экспериментальными методами.

Вместе с тем с начала 90-х годов число источников нейтронов в мире начало неуклонно уменьшаться, и в начале следующего столетия оно может достигнуть уровня 60-х годов. Этот процесс обусловлен целым рядом причин. Во-первых, выводятся из эксплуатации реакторы, построенные в конце 50-х - начале 60-х годов, а против строительства новых настроена общественность



многих стран. Во-вторых, были созданы источники нейтронов испарительного типа на базе протонных ускорителей. Эти источники, хотя создание их требует больших средств и времени, являются весьма эффективными. В-третьих, широкое распространение получили исследования на источниках синхротронного света. Эти исследования являются существенным дополнением к нейтронным и несколько уменьшают потребность в последних.

Таким образом, сегодняшнее положение с источниками нейтронов вообще и реакторными источниками в частности требует обсуждения и координации на международном уровне, поскольку указанные выше причины уменьшения числа нейтронных источников связаны с общими научными и общественными процессами. Мы не обсуждаем здесь причины, которые можно только констатировать, например, заметный спад за последние годы в развитии реакторов в России, которая имеет огромный научный потенциал и опыт в данной области.

В докладе сделана попытка анализа ситуации с реакторными источниками нейтронов в мире, он не содержит детальной информации о реакторах, поскольку в отведенное для доклада время более важно, на мой взгляд, обсудить общие вопросы. Детально состояние и перспективы развития источников нейтронов обсуждались на Совещании экспертов по источникам синхротронного излучения и нейтронным пучкам Форума меганаук, проведенном 29 ноября - 1 декабря 1993 г. в Рисе (Дания) Организацией экономического сотрудничества и развития<sup>[1]</sup> (The OECD Megascience Forum Expert Meeting on Synchrotron Radiation Sources and Neutron Beams, 29 November - 1 December 1993, Riso, Denmark). При подготовке статьи мы ориентировались на источники, используемые преимущественно для чисто физических исследований, что неизбежно ведет к определенной доле субъективности. Поэтому автор заранее приносит извинения за возможные неточности и будет благодарен за любую корректирующую информацию.

## 2. Применение нейтронов

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, неразрушающего контроля материалов и 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 нового физического явления может служить расшифровка структуры высокотемпературных сверхпроводников.

В последнее время в указанных областях исследований все большее распространение получают источники синхротронного света, главными достоинствами которых являются высокая светосила и перестраиваемость по энергии. Однако это не означает, что источники синхротронного излучения вытесняют нейтроны - эти два метода являются взаимодополняющими. Нейтроны имеют ряд свойств, несомненно выделяющих их среди других частиц, используемых в физике конденсированных сред, среди которых фотоны, электроны, мюоны, протоны.

Нейтроны в веществе испытывают взаимодействия как с ядрами, так и со спинами электронов атомов. Очень важное обстоятельство состоит в том, что эти взаимодействия являются относительно слабыми: нейтроны не нарушают структуру и химические свойства вещества, как это происходит, например, в фотоэмиссии, поэтому при вычислении сечения рассеяния достаточно ограничиться первым порядком теории возмущений. Слабое взаимодействие обуславливает и большую глубину проникновения нейтронов в образец, в отличие от фотонов, что позволяет исследовать объемные структурные и

динамические свойства в экспериментах по упругому и неупругому рассеянию. В то же время нейтроны позволяют исследовать и свойства поверхностей, что является существенным дополнением к исследованиям с помощью рентгеновских лучей, особенно магнитных систем. Амплитуда ядерного рассеяния определяется свойствами ядерных сил и имеет изотопную зависимость. Может быть так, что изотопы одного элемента будут иметь амплитуды разного знака, что дает уникальную возможность изотопного контрастирования в исследуемом образце. Кроме того, амплитуда рассеяния не зависит от атомного номера регулярным образом, как для фотонов. Легкие элементы, например водород, имеют значительно большую амплитуду, что позволяет нейтронам эффективно, в отличие от фотонов, "высвечивать" их в структуре.

Перечисленные свойства дополняются тем замечательным обстоятельством, что длина волны тепловых нейтронов  $\lambda \sim 1-10 \text{ \AA}$  и их энергия  $E_n = 1-100 \text{ мэВ}$  в точности соответствуют типичным межатомным расстояниям в твердых телах и жидкостях и характерным энергиям возбуждений. Таким образом, источник тепловых нейтронов дает возможность исследовать и структуру, и динамику вещества.

Возможности исследований с нейтронами расширяются 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, возможность изучения объектов малых размеров, возможность изучения 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.

В табл.1 показаны наиболее широко применяемые 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

Таблица 1. Наиболее широко используемые способы получения нейтронов для физических исследований

Reaction	Number of neutrons	Examples	Target power, MW	Neutron flux, $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Fission	$\sim 2$ / fission	HFR, Grenoble	57	$2 \cdot 10^{15}$
Modulation of reactivity, reflector	$\times 100-200$	IBR-2, Dubna (pulsed)	2	$10^{16}$
$(e, \gamma)$ , $(\gamma, n)$ in a heavy metal target	$\sim 5 \cdot 10^{-2}$ /100 МэВ	ORELA, Oak Ridge	0.05	$1.3 \cdot 10^{14}$
Multiplicating target, Pu	$\times 20$	IBR-30, Dubna IREN, Dubna (project)	0.01 0.01	$5 \cdot 10^{14}$ $10^{15}$
Proton spallation	$\sim 30$ /800 МэВ	ISIS, London	0.2	$1.3 \cdot 10^{15}$
Multiplicating target $^{233}\text{U}$	$\times 20$	IN-0.6, Moscow (project)	2	$2 \cdot 10^{16}$

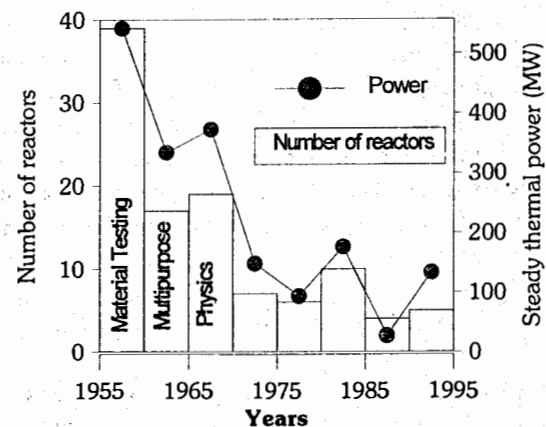


Рис.1. Численность вводимых в эксплуатацию реакторов в мире и производимая ими мощность

действия, в которых модуляция реактивности повышает выход полезных для пучковых исследований нейтронов в 100–200 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. Далее мы рассмотрим современное состояние реакторных источников нейтронов для физических исследований.

### 3. Реакторы с постоянным потоком

О реакторах с постоянным потоком имеется много обзорных материалов. Журнал "Neutron News" начиная с 1990 года регулярно публикует подробные обзоры о нейтронных источниках. На Международной конференции по рассеянию нейтронов в Бомбее в 1991 году были представлены обзоры о реакторах Азии [2] и Европы [3], а

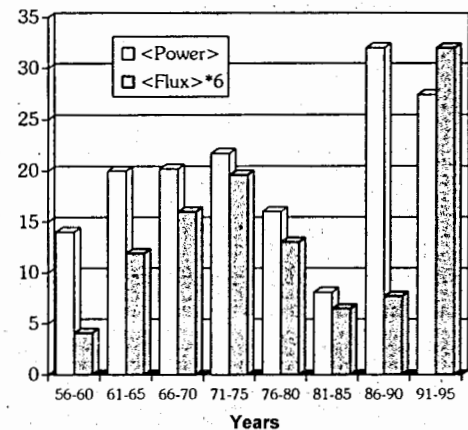


Рис.2. Динамика (по годам принятия в эксплуатацию) тепловой мощности и плотности потока нейтронов реакторов в мире

Таблица 2. Реакторы для рассеяния нейтронов

Country	Reactor	Location	Criticality (year)	Power (MW)	Thermal Flux (10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> /s)	Cold source	Instru-ment
Australia	HIFAR	Lucas Heights	1958	10	1		8
Austria	ASTRA	Vienna	1960	10	1.4		5
Bangladesh	TRIGA-II	Dhaka	1986	3	0.5		1
Belgium	BR2	Mol	1962/63	85	12		4
Canada	NRU	Chalk River	1957	125	3		6
	MNR	McMaster	1959	1	0.2		7
Czech Rep.	WWR	Rez	1974	10	1		4
China	HWRR	Beijing	1958/80	15	2.8	1	5
Denmark	DR-3	Riso	1960	10	1.5	1	7
Egypt	WWR	Cairo	1961	2	0.1		3
Finland	FIR-3	Espoo	1962	0.25	0.1	1	3
France	SILOE	Grenoble	1962/87	35	4		6
	HFR-ILL	Grenoble	1971/94	58	15	2	32
	ORPHEE	Saclay	1980	14	2.5	3	22
Germany	FRM	Garching	1957	4	0.2	1	10
	FRJ-2	Jülich	1962/72	23	2	1	18

\*Таблица 2. Реакторы для рассеяния нейтронов (продолжение)

	FRG	Geesthacht	1963	5	0.5	1	7
	FRMB	Braunschweig	1967	1	0.14		5
	BER-II	Berlin	1973/91	10	1	1	14
Greece	GRR-I	Athens	1959	5	0.5		1
Hungary	WWR	Budapest	1992	10	1		10
India	CIRUS	Bombey	1960	40	0.6		4
	DHRUVA	Bombey	1985	100	2	1	13
Italy	TRIGA RC-1	Rome	1967	1	0.3		3
Japan	JRR-3M	Ibaraki	1990	20	2	1	20
Korea	KMRR	Seoul	1992	30	5		
Netherlands	HFR	Petten	1961/70	45	1		7
	HOR	Delft	1963/68	2	0.2		8
Norway	JEEP2	Kjeller	1966	2	0.25	1	7
Poland	MARIA	Swierk	1974/94	30	3.3		
Portugal	RP-1	LNETI	1961	1	0.12		2
Roumania	WWR	Bucharest	1958	8	0.8		3
Russia	WWR-M	Gatchina	1959	16	1		12
	WWR-C	Obninsk	1964	13	1		4
	IWW-2M	Ekaterinburg	1966/83	15			6
	IRT	Moscow	1967/75	2.5	0.3		4
	IR-8	Moscow	1981	8	1		10
	IBR-2 (pulsed)	Dubna	1984	2/1500	0.1/100	1	14
Sweden	R-2	Studsvik	1960	50	4		8
Switzerland	SAPHIR	Villingen	1957/84	10	1		4
US	MITR-II	Cambridge	1958	5	1		6
	RINSC	R.Island	1964	2	0.14		2
	HFBR	Brookhaven	1965	60	9	1	15
	HFIR	Oak Ridge	1966	100	30		10
	MURR	Missouri	1966	10	1.2		14
	NBSR	Gaithersburg	1969	20	4	1	9

также Японии<sup>[4]</sup>, России<sup>[5,6]</sup> и США<sup>[7,8]</sup>. Отсылая читателя за деталями к этим публикациям, здесь мы обсудим качественную картину и тенденции.

На рис.1 показано число и тепловая мощность реакторов, вводимых в эксплуатацию каждые пять лет, начиная с 1955 года до 1994 года. Видно, что 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 третьего поколения, т.е. реактор, предназначенный для пучковых исследований, был создан в 1965 г. в Брукхейвене - реактор HFBR мощностью 60 МВт.

Эволюцию развития исследовательских реакторов можно проследить на рис.2. 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), ОРПНЭЕ в LLB (Сакле, Франция), ИР-8 в Российском научном центре "Курчатовский институт" (Москва, Россия), ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ (Дубна, Россия) и др.

В настоящее время в мире работает около пятидесяти исследовательских реакторов, на которых проводятся пучковые исследования. Основные из этих реакторов приведены в табл.2. При этом, как видно из рис.3, 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.

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 (см. рис.4). Для расширения диапазона энергий нейтронов, а следовательно, диапазона изучаемых явлений, используют специальные устройства, располагаемые вблизи активной зоны реактора и называемые

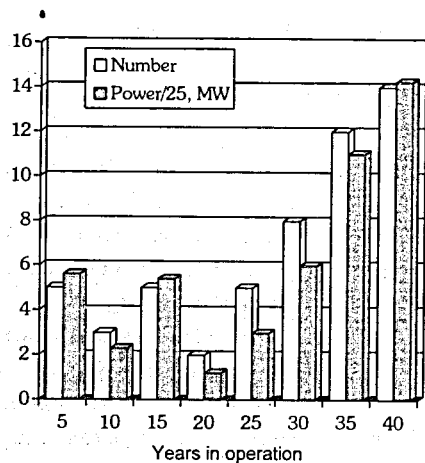


Рис.3. Возраст существующих в мире реакторов (согласно таблице 2)

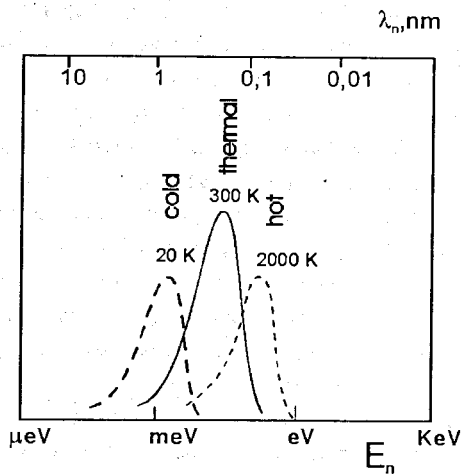


Рис.4. Спектральное распределение потока нейтронов от стационарных реакторов

холодными и горячими замедлителями, которые увеличивают долю холодных или надтепловых нейтронов соответственно. В последнее время особое распространение получили холодные замедлители в связи с возросшим интересом к длиннопериодным структурам и медленным процессам в конденсированных средах. Практически все ведущие нейтронные центры сегодня имеют холодные замедлители на реакторах, в основном, жидководородные. В Японии (Цукуба) и в России (Дубна) имеется опыт работы с замедлителями из твердого метана.

На нескольких реакторах используются ультрахолодные нейтроны, впервые экспериментально наблюдавшиеся в 1968 г. в Дубне и используемые в первую очередь для фундаментальных исследований. Затем эти исследования успешно развивались в ПИЯФ РАН (Гатчина), РИЦ КИ (Москва) и ILL (Гренобль).

В конечном счете эффективность работы реактора определяется работой экспериментальных установок. В табл.3 приведены примеры реакторов третьего поколения и частично второго, ориентированных в основном на пучковые исследования (с учетом сделанных во введении оговорок). 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 реакторы 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 IP-8, является, по-видимому, оптимальным для реакторов

Таблица 3. Высокоточные исследовательские реакторы и используемые измерительные приборы

Country	Reactor	Location	Year	P (MW)	Flux $10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> /sec	Beam ports include guides	Special moderator	Instruments for Neutron Scattering					
								Difr.	SANS	Reflect.	Spectr.	Special Instr.	Total Instr.
Canada	NRU	Chalk River	1957	125	3	6	C	3	1	0	2	0	6
Denmark	DR-3	Risø	1960	10	1.5	4	C	1	1	0	5	0	7
France	SILOE	Grenoble	1962/87	35	4	3	-	4	0	0	2	0	6
France	HFR-ILL	Grenoble	1971/94	58	15	26	2C,1H	13	2	0	12	5	32
France	ORPHEE	Saclay	1980	14	2.5	20	2C,1H	10	4	1	7	0	22
Germany	FRJ-2	Jülich	1962/72	23	2	8	C	4	3	1	7	3	18
Germany	BER-II	Berlin	1973/91	10	1	9	C	6	1	1	5	1	14
Hungary	WWR	Budapest	1992	10	1	8	-	2	1	1	3	3	10
India	Dhruva	Bombay	1985	100	2	13	C	3	1	0	8	1	13
Japan	JRR-3M	Ibaraki	1990	20	2	26	C	4	1	0	10	5	20
Netherlands	HFR	Petten	1961/70	45	1	12	-	3	1	0	2	1	7
Russia	WWR-M	Gatchina	1959	16	1	14	-	3	2	0	1	6	12
Russia	IR-8	Moscow	1981	8	1	12	C	2	0	0	3	5	10
Russia	IWW-2M	Ekaterinburg	1966/83	15	2	6	-	4	1	0	1	0	6
Russia	IBR-2 (pulsed)	Dubna	1984	2/1500	0.1/100	14	C	6	1	2	4	1	14
Sweden	R-2	Studsвик	1960	50	4	8	C	6	0	0	2	0	8
Switzerland	SAPHIR	Villingen	1957/84	10	1	4	-	2	0	0	2	0	4
US	HFBR	Brookhaven	1965	60	9	9	C	3	3	1	6	2	15
US	HFIR	Oak Ridge	1966	100	30	4	-	4	1	0	5	0	10
US	MURR	Missouri	1966	10	1.2	6	-	3	2	1	2	6	14
US	NBSR	Gaithersburg	1969	20	4	5	C	2	0	0	6	1	9

средней мощности и может служить хорошим примером организации работы национального центра.

Кроме технических характеристик весьма существенным показателем является стоимость установок. Стоимость реактора в значительной мере определяется его средней мощностью, поэтому условной характеристикой, определяющей стоимость производимого нейтрона, можно считать отношение плотности потока к средней мощности. Условной характеристикой эффективности использования источника может служить это отношение, умноженное на число экспериментальных установок. На рис.5 показаны эти характеристики для "усредненного" реактора в разные периоды времени и для реакторов HFR, ORPHEE и ИБР-2. Рис.5 наглядно показывает преимущества реакторов HFR и ORPHEE среди стационарных реакторов. По обсуждаемым показателям заметно выделяется реактор ИБР-2, поэтому мы обсудим его отдельно в следующем разделе.

Итак, если мы посмотрим на табл.2, то покажется, что число реакторов в мире достаточно велико. Однако не все из них вполне удовлетворяют требованиям современных установок для физических исследований. После создания первого специализированного реактора третьего поколения HFBR (BNL, Брукхейвен) в 1965 году было принято в эксплуатацию лишь около десятка современных реакторов такого же типа. В целом, несмотря на весьма развившиеся в последние годы средства повышения эффективности использования реакторов - замедлители, нейтронводные системы, современные спектрометры, число современных реакторов для физических исследований в мире явно недостаточно для удовлетворения все возрастающих потребностей физиков, биологов, химиков и материаловедов.

#### 4. Импульсные реакторы

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



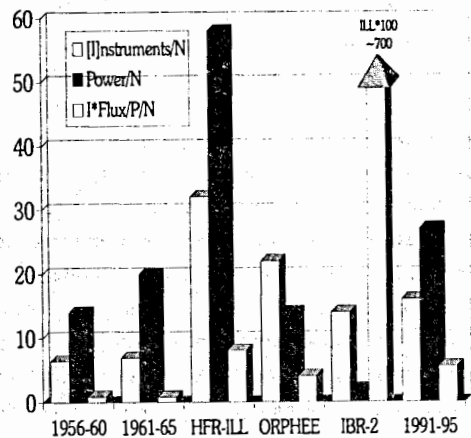


Рис.5. Число приборов (I), тепловая мощность (P) и производство  $I^*$  плотность потока/ P усредненного реактора в разные периоды времени в сравнении с реакторами HFR, ORPHEE и ИБР-2

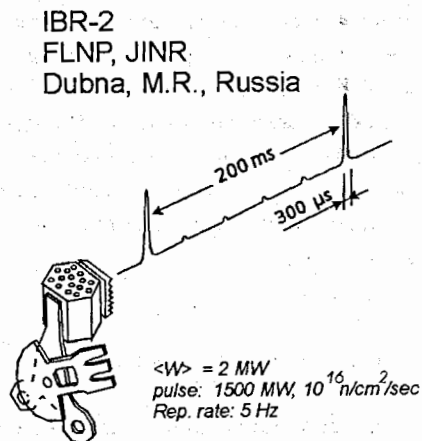


Рис.6. Принципиальная схема импульсного реактора периодического действия ИБР-2

Наиболее распространены реакторы первого типа, главным образом для радиационных исследований по причине возможного 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 эксперимент по измерению времени жизни на установке для ультрахолодных нейтронов с рекордной плотностью до  $10^5 \text{ н/см}^3$ , готовящийся в ВНИИЭФ (Арзамас-16, Россия) на реакторе БИГР группой из ЛФ им. Франка. (Для сравнения, на источнике ILL она составляла  $10^2 \text{ н/см}^3$ ). Исключение составляют реакторы типа TRIGA, которые имеют большой, практически мгновенный отрицательный температурный коэффициент, что обеспечивает высокую степень безопасности. Поэтому эти реакторы получили широкое распространение. 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. в Обнинске (Россия) [10]. Реактор начал сооружаться в Дубне в 1957 году под руководством Д.И. Блохинцева, он был введен в эксплуатацию 23 июня 1960 г. на средней мощности 1 кВт и с частотой повторения нейтронных импульсов от 5 до 50 Гц. С 1964 года реактор ИБР начал использоваться как фотоядерный супербустер, т.е. реактор играл роль размножающей мишени с модуляцией реактивности в комплексе с ускорителем электронов. В 1969 г. мощность реактора была доведена до 25 кВт; и ускоритель заменен на линейный ускоритель электронов с энергией 40 МэВ. Установка получила название ИБР-30. с 1986 г. ИБР-30 работает без модуляции реактивности, т.е. как фотоядерный источник с размножающей мишенью (бустер) со средней мощностью 10 кВт и плотностью потока тепловых нейтронов в импульсе  $5 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2/\text{с}$  при ширине импульса 3-4 мкс.

В 1984 г. в Дубне был принят в эксплуатацию новый импульсный реактор ИБР-2, отличающийся по конструкции от первого ИБР и дающий при средней мощности 2 МВт рекордный поток тепловых нейтронов в импульсе с поверхности замедлителя:  $10^{16} \text{ н/см}^2/\text{с}$ . Принципиальная схема реактора ИБР-2 показана на рис.6

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. 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 15 лет, 5-7 лет - срок эксплуатации подвижного отражателя. Таким образом, реактор ИБР-2 является очень дешевой и экономичной, что определяется средней мощностью, и, как показал опыт 10-летней работы, простой и безопасной в эксплуатации машиной.

Теплофизические характеристики и кинетика реактора типа ИБР очень близки к таковым у реакторов стационарного действия. Поэтому ИРПД стоят к ним гораздо ближе, чем ИРСД, и в этом смысле более правильно было бы называть их пульсирующими реакторами.

Имея самый высокий в мире поток тепловых нейтронов в импульсе, реактор ИБР-2 уступает испарительным источникам нейтронов по ширине импульса (~300 мкс), что часто отмечают в качестве недостатка импульсного реактора, поскольку эта характеристика источника влияет на разрешающую способность измерительных приборов. 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<sup>[11]</sup> (рис. 7) и неупругого<sup>[12]</sup> (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<sup>[11]</sup> (ФДВР), поскольку дифрактометрия является наиболее продуктивным направлением использования импульсных источников. В настоящее время в мире имеется три прибора такого класса - это HRPD на ISIS, DN-2 на NFR и ФДВР на ИБР-2.

Возможности пульсирующих реакторов далеко не исчерпываются параметрами реактора ИБР-2. Опыт создания и эксплуатации таких

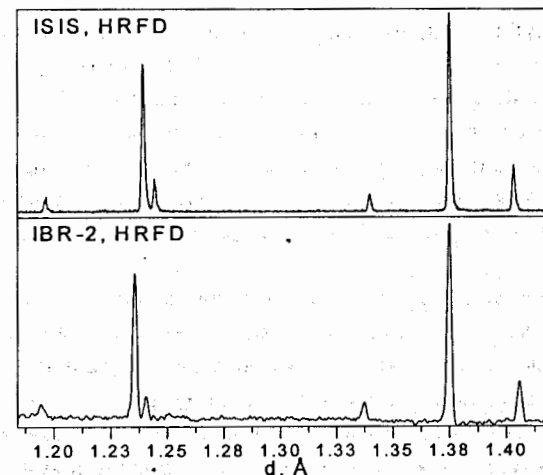


Рис.7. Часть дифрактограммы стандартного образца  $Al_2O_3$ , измеренной на дифрактометрах HRPD на ISIS (вверху) и ФДВР на ИБР-2 (внизу)

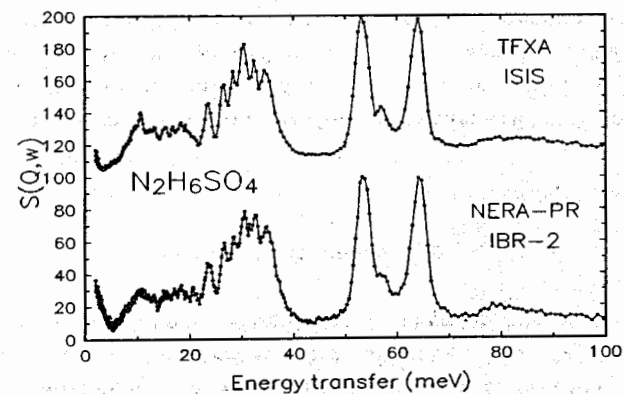


Рис.8. Спектры высокого разрешения при рассеянии на сульфате гидрозина, измеренные на спектрометрах TFXA (ISIS) и NERA-PR (ИБР-2)

реакторов в Дубне показывает, что подобная установка может быть спроектирована с лучшими, чем у ИБР-2 характеристиками, как нейтронно-физическими, так и эксплуатационными<sup>[13]</sup>. 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.

Таким образом, опыт эксплуатации реакторов TRIGA и ИБР-2 показывает, что в распоряжении физиков имеются дешевые, безопасные и эффективные импульсные источники нейтронов. Особенно это относится к высокопоточному реактору ИБР-2, который 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 ее вполне можно пожертвовать для достижения более высокого потока. Наш опыт показывает, что выполняется предположение<sup>[14]</sup> о том, что для идеально сконструированных приборов, требующих нейтронной монохроматизации, усредненный по времени нейтронный поток для импульсных машин равен их пиковому потоку. 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.

## 5. Обозримые перспективы

Как видно из данных рис.1, общее число реакторов в мире уменьшается, и эта тенденция сохранится, поскольку большинство работающих реакторов уже приближаются к естественному окончанию срока эксплуатации (рис.3). Можно ожидать, что из существующих реакторов после 2005 года сохранятся реакторы ОРПНЭЕ (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 конце этого года снова должен начать функционировать после ремонта реактор HFR (ILL). Он сохранит свои лидирующие позиции как международный центр еще лет 10-20. В следующем году, по-видимому, начнут работать нейтронные источники испарительного типа с постоянным потоком SINQ в PSI (Виллиген, Швейцария<sup>[3]</sup>) и импульсный источник на линейном протонном ускорителе Московской мезонной фабрики (Институт ядерных исследований Российской академии наук, Троицк, Россия<sup>[15]</sup>). Улучшения параметров (повышение потока и уменьшение ширины импульса) можно ожидать от запланированной модернизации реактора ИБР-2 в 1997-1998 гг. В более далекой перспективе можно рассчитывать на разрабатываемые в настоящее время Европейские проекты импульсных источников испарительного типа AUSTRON и ESS.

К сожалению, остается не реализованным проект реактора ПИК в Гатчине (Россия)<sup>[5]</sup>. Это проект современного реактора третьего поколения, рассчитанного на мощность 100 МВт, поток нейтронов  $4,5 \times 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>с, с двумя холодными и двумя горячими источниками, экспериментальным (около реактора) и нейтроннопроводным залами 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. Если бы проект был завершен (для этого необходимо около 30 млн. долл. США), 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 ОРПНЭЕ. Возможно, что вопрос о его создании решится в этом году.

Неопределенная ситуация сохраняется с модернизацией реактора ИР-8 в РИЦ КИ (Москва). Этот реактор также рассчитан на

мощность 20 МВт с плотностью потока тепловых нейтронов до  $7 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>·с. Высокая относительная плотность потока достигается за счет компактной активной зоны, состоящей из тепловыделяющих систем с высоким коэффициентом размножения и малой длиной миграции нейтронов, обеспечивающей высокий выход нейтронов в бериллиевый отражатель.

В США перспектива развития исследований на реакторах связана с совершенствованием существующих реакторов и с проектом Advanced Neutron Source (ANS)<sup>[8]</sup> в Ок-Ридже, представляющем собой тяжеловодный реактор с мощностью 350 МВт и потоком тепловых нейтронов до  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>·с. Новый реактор будет иметь поток в 10 раз выше, чем имеет существующий в Ок-Ридже реактор HFIR, и в 5+6 раз выше, чем имеет реактор HFR в Гренобле. По своему назначению реактор ANS является многоцелевым, но благодаря высокой мощности и плотности потока он будет в состоянии обеспечить исследования более чем 1000 пользователей в год. Стоимость проекта оценивается в ценах 1992 года в 1500 млн. долл. США. Имеется еще 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.

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) и DHRUVA (Бомбей). 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 года) 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 <sup>235</sup>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. Поэтому если заинтересованные сообщества не предпримут активных действий, то перспективы у реакторов будут весьма скромными.

## 6. 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 в Рисе, общее число пользователей оценивается только в странах Организации экономической кооперации и развития ~4000 в 1993 г. и, как ожидаемое, ~7000 в 2000 году. В последние годы были созданы общества по рассеянию нейтронов в ряде стран: в Австралии, Канаде, Японии, Швейцарии, США, Италии. В Германии нейтронное сообщество организовано Комитетом по исследованиям с нейтронами при ВМФТ, в России - Научным советом Национальной программы "Нейтронные исследования

вещества", образованной в этом году Министерством науки и технической политики Российской Федерации. Обсуждается вопрос о создании Европейской Федерации сообществ по рассеянию нейтронов. Таким образом, необходимость нейтронов для науки обуславливает необходимость иметь соответствующее число источников нейтронов.

Ядерные реакторы в настоящее время являются наиболее распространенными источниками нейтронов для физических исследований и необходимость в них сохранится еще долго. Стремление уйти от возможных ядерных аварий обуславливает общую тенденцию к развитию испарительных источников. С этой точки зрения наиболее оптимальным, по-видимому, является более дешевый протонный бустер, т.е. мощный линейный протонный ускоритель 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.

Пучковые исследования с нейтронами являются примером "малой" (small-scale) науки на крупномасштабных установках, когда типичная группа пользователей состоит из нескольких ведущих сотрудников, аспирантов и студентов. Типичный эксперимент проходит в течение нескольких дней. Поскольку на мегаустановках время для эксперимента можно получить не так часто, например, в ILL заявки принимаются два раза в год, то для целей образования и подготовки экспериментов (помимо самостоятельного значения) особое значение имеют реакторы среднего класса (10-20 МВт) для локального пользования. В плане общей стратегии наиболее оптимальным было бы наличие 2-3 международных центров на базе мощных специализированных реакторов типа HFR ILL и сети реакторов типа ORPHEE. В идеальном случае было бы экономичнее закрыть старые реакторы первого и второго поколения и сосредоточиться на более эффективном использовании реакторов третьего поколения и строительстве новых. Однако реальная жизнь не позволяет этого сделать, поэтому представляется целесообразным поддержать существующие проекты и дать старым реакторам доработать оставшееся им время.

Большой научно-технический потенциал и опыт работы в реакторостроении и использовании нейтронов в физических

исследованиях имеется в бывшем Советском Союзе и странах Восточной Европы. По-видимому, в интересах мирового сообщества оказать поддержку наиболее интересным проектам в этих странах с участием физиков западных стран.

Современные крупные установки стоят очень дорого. Так, строительство современного реактора постоянного действия стоит несколько сотен миллионов долл. США при ежегодной оплате эксплуатации порядка нескольких десятков миллионов долларов. Поэтому решить все вопросы создания реактора, его инфраструктуры, обеспечения приборной базы, организации работы пользователей и т.д. можно только в результате координированной деятельности и в международной кооперации.

Автор весьма признателен А.В.Белушкину, В.А.Трунову и Е.П.Шабалину за полезные обсуждения.

## Литература

1. T.Riste, Analytical Report of the OECD Megascience Forum Expert Meeting on Synchrotron Radiation Sources and Neutron Beams (29 November - 1 December 1993, Riso, Denmark), DSTI/STP/MS (94)2.
2. K.R.Rao, Physica B 174 (1991) 491.
3. G.S.Bauer and G.Thamm, *ibid.*, 476.
4. S.Funahashi, *ibid.*, 470.
5. A.I.Okorokov, *ibid.*, 443.
6. V.L.Aksenov, *ibid.*, 438.
7. J.M.Rowe and H.J.Prask, *ibid.*, 421.
8. C.D.West, *ibid.*, 430.
9. Е.П.Шабалин, Импульсные реакторы на быстрых нейтронах, М.: Атомиздат, 1976.
10. И.И.Бондаренко, Ю.Я.Стависский, Атомная энергия, 7 (1959) 417.
11. V.L.Aksenov, A.M.Balagurov, V.G.Simkin, Yu.V.Taran, V.A.Trunov, V.A.Kudrjashov, A.P.Bulkin, V.G.Muratov, P.Hiismaki, A.Tiita and O.Antson, in Proc. of XII ICANS Meeting, Abingdon 1993 (Reports of Rutherford Appleton Lab. RAL 94-025, 1994) vol. I, p. I-124.
12. I.Natkaniec, S.I.Bragin, J.Brankowski and J.Mayer, *ibid.*, I-89.
13. Т.П.Шабалин and А.Д.Рогов, In Pulsed Nuclear Reactors: New Capabilities for Scientific Research JINR Reports D3-92-76, Dubna 1992, p.42.
14. F.Mezei, Neutron News 5 (1994) # 3, 2.
15. A.V.Demytyev, V.G.Miroshnichenko, I.Y.Mosievskaya, S.F.Sidorkin, N.M.Sobolevsky and Yu.Ya.Stavissky, RAL 94-025, 1994, vol. II, p. T71.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 сентября 1994 года.