

Некоторые проблемы разработки быстрых реакторов

В апреле 1978 г. в Болонье (Италия) проходил Международный симпозиум по проектированию, строительству и опыту эксплуатации жидкометаллических быстрых реакторов, который собрал около 500 представителей более чем 30 стран и международных организаций.

За последнее время в СССР, США, Франции, Великобритании, ФРГ и Японии накоплен большой опыт по основным аспектам разработки быстрых реакторов, что позволяет с достаточной уверенностью приступить к созданию первых коммерческих установок. Усилия в этом направлении вполне оправдываются, так как только быстрые реакторы могут решить проблему полного использования урана и дать гарантированный на столетия источник энергии. Поэтому многие страны проявляют долгосрочный интерес к развитию быстрых реакторов и организации эффективного замкнутого топливного цикла ядерной энергетики. В результате возникли и требуют решения проблемы, связанные с гарантиями безопасности ядерного топливного цикла и экономической сбалансированностью использования АЭС с реакторами различных типов.

Процесс создания коммерческих быстрых реакторов можно условно разделить на три стадии — экспериментальную, опытно-промышленную (демонстрационную) и коммерческую, каждая из которых характеризуется определенными научно-техническими задачами.

Сейчас Великобритания, США, Франция и СССР уже имеют 10—15-летний опыт эксплуатации экспериментальных быстрых реакторов тепловой мощностью

~60 МВт (мощность Rapsodie 40 МВт), в ФРГ и Японии аналогичные установки находятся в стадии выхода на мощность (табл. 1). В течение этого периода экспериментальные реакторы оставались основным инструментом в программах исследования поведения топлива и материалов под облучением, играли существенную роль в изучении безопасности и накопления опыта эксплуатации натриевого технологического оборудования. Сооружаемый в США реактор FFTF с максимальным проектным потоком нейтронов $7 \cdot 10^{15}$ нейтр./ (см²·с) будет иметь уникальные возможности для облучения материалов.

Настоящий период можно рассматривать как завершение демонстрационной стадии, характеризуемой строительством и эксплуатацией опытно-промышленных (демонстрационных) установок с быстрыми реакторами электрической мощностью 250—350 МВт и переходом к созданию головных образцов коммерческих установок с быстрыми реакторами большой мощности (табл. 2).

Результаты, полученные на экспериментальной и демонстрационной стадиях. Прежде всего были подтверждены возможности быстрого реактора как размножающей системы. Теоретическое и экспериментальное значения K_{∞} — 1 для Phenix составляют $0,13 \pm 0,04$ и $0,16 \pm 0,05$ соответственно. Доказана способность стабильной, надежной и безопасной работы быстрого реактора с натриевым охлаждением, что в первую очередь определяется отрицательными температурно-мощностным и пустотным эффектами реактивности. Продемонстрирована возможность достижения глубо-

Крупные экспериментальные быстрые реакторы

Таблица 1

Страна	Установка	Мощность, МВт (тепл.)	Пуск	Состояние
Великобритания	DFR	60	1959 г.	Остановлен в 1977 г. в связи с выполнением программы исследований
СССР	БОР-60	60	1969 г.	Эксплуатируется
США	EBR-II FFTF	62,5 400	1963 г. 1979 г.	Эксплуатируется Строительство завершено на 95%
Франция	Rapsodie	40	1967 г.	Эксплуатируется
ФРГ	KNK II	58	1977 г.	В стадии выхода на мощность. В 1973—1974 гг. эксплуатировался как тепловой реактор
Япония	JOYO	100	1977 г.	В стадии выхода на мощность 50 МВт
Италия	PEC	120		Строится

Демонстрационные установки с быстрыми реакторами

Таблица 2

Страна	Установка	Мощность, МВт (эл.)	Пуск	Выход на полную мощность	Состояние
Великобритания	PFR	250	1974 г.	1977 г.	Эксплуатируется
СССР	БН-350 БН-600	150* 600	1973 г.		С марта 1976 г. эксплуатируется на мощности 65% номинальной Строится
США	EFFBR CRBRP	60 350	1963 г.		В 1970—1972 гг. эксплуатировался на полной (разрешенной) мощности. Остановлен в 1972 г. Строительство прекращено
Франция	Phenix	250	1973 г.	1974 г.	В стадии выхода на мощность после ремонта теплообменников
ФРГ	SNR-300	327	Начало 80-х гг.		Строится с 1973 г.
Япония	MONJU	300	1985 г.		Строительство планируется начать в 1979 г.

* Плюс 5 000 т/ч опресненной воды.

ких выгораний при использовании ТВЭЛов на смешанном окисном топливе (табл. 3).

Результаты, полученные во Франции, показывают, что оболочка из нержавеющей стали 316 не позволяет увеличить выгорание топлива свыше 66 000 МВт·сут/т при предельном допустимом 6%-ном изменении ее диаметра (рис. 1). Это примерно соответствует флюенсу $2 \cdot 10^{23}$ нейтр./см². Перспективным считается использование нержавеющей стали 316, стабилизированной титаном (рис. 2).

Работы, проведенные в США, позволили получить уверенность в возможности достижения выгораний на смешанном окисном топливе выше 80 000 МВт·сут/т.

Результаты облучения ТВЭЛов на окисном топливе

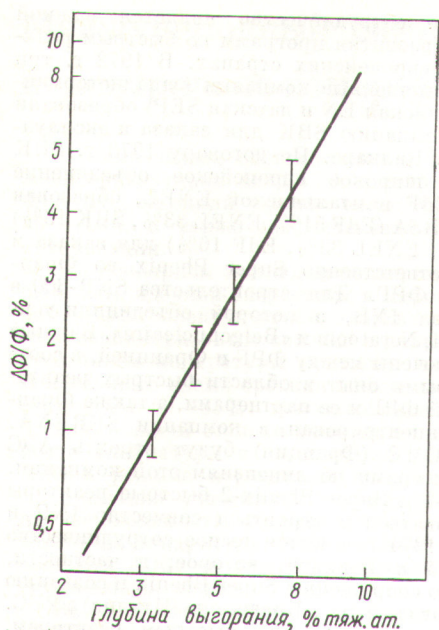
Таблица 3

Установка	Число облученных ТВЭЛов	Максимальная глубина выгорания	Линейное тепловыделение, кВт/м
Rapsodie	20 000	15,45% тяж. ат.	42,5—37,6 (в конце кампании)
Phenix	11 000, из них 65% (U, Pu)O ₂	50 000 МВт·сут/т	43—45
DFR	950 1 200	60 000 МВт·сут/т 21,5% тяж. ат.	45

В DFR ТВЭЛы на окисном топливе достигли в номинальном режиме проектного выгорания 10% тяж. ат. без каких-либо повреждений. При этом флюенс составил $1,5 \cdot 10^{23}$ нейтр./см². Получен также опыт работы ТВЭЛов при тепловыделении до 79 кВт/м. В одной из сборок зафиксировано массовое повреждение ТВЭЛов (вертикальная трещина на покрытии) при тепловыделении 60—63 кВт/м. Последующее облучение дефектных ТВЭЛов в течение 300 сут приводило к вторичному растрескиванию и увеличению диаметра оболочки, однако вынос топлива был минимальным и «закупорки потока» не наблюдалось. Делался вывод, что разуплотненные ТВЭЛы могут без особого риска оставаться в реакторе 50—100 сут. Однако такой вывод не может считаться окончательным для коммерческих реакторов.

Продемонстрирована удовлетворительная работа натриевого технологического оборудования и систем. Однако имели место случаи выхода из строя теплообменного оборудования: четыре течи в теплообменниках Phenix в 1976—1977 гг. вследствие образования трещин; 12 небольших течей в парогенераторах PFR с октября 1974 г. Причина течей — коррозия под напряжением. Принято решение использовать в испарителях и пароперегревателях CDFR производимую промышленностью для АGR сталь, содержащую 9% хрома. Устранение подобных аварий дало большой опыт проведения ремонтных работ.

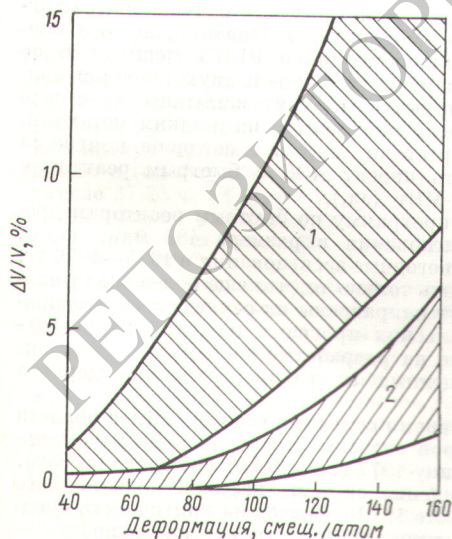
Особенности и проблемы перехода к строительству АЭС с быстрыми реакторами большой мощности. Все страны рассматривают имеющиеся или разрабатываемые демонстрационные реакторы как основу для создания коммерческих установок мощностью 1000—1800 МВт (эл.). Более того, первые коммерческие реак-



Р и с. 1. Максимальное относительное изменение диаметра оболочек твэлов реактора Phenix

торы в Великобритании, Франции, ФРГ и Японии будут создавать с минимальными проектными изменениями по отношению к соответствующим демонстрационным установкам (табл. 4). Эти изменения определяются в основном масштабированным фактором, опытом эксплуатации демонстрационных установок и экономическими соображениями.

АЭС в Крейс-Мальвиле явится началом большой программы строительства коммерческих реакторов во Франции, предусматривающей со сдвигом в 2—3 года



Р и с. 2. Деформация нержавеющей стали 316 (1) и нержавеющей стали 316, стабилизированной титаном (2)

по отношению к Super Phenix строительство двух, а затем (с таким же сдвигом) еще двух АЭС мощностью аналогичной или несколько большей, чем у Super Phenix. Примерно также структурно выглядит и японская программа, причем на сооружение установок MONJU и «Demo» предусматривается около 6—7 лет. Такая организация программы должна помочь создать мощную индустриальную основу и значительно улучшить экономику ранних коммерческих быстрых реакторов.

Предполагается, что к концу столетия доля АЭС с быстрыми реакторами в ядерной энергетике мира может оказаться существенной, т. е. основные коммерческие выгоды от их эксплуатации ожидаются в будущем столетии.

Проекты коммерческих установок разрабатываются как с петлевой, так и с интегральной компоновкой оборудования первого контура. Представляется, что на демонстрационной стадии преимущества и недостатки этих концепций взаимно компенсируются, и поэтому страны продолжают разработку национальных концепций.

В некоторых странах проекты реакторов большой мощности основаны на использовании большего числа компонентов, а не компонентов большего размера, что касается, в первую очередь, тепловыделяющих сборок и парогенераторов (табл. 5,6).

Почти во всех проектах ранних коммерческих быстрых реакторов для повышения надежности установки предполагается снижение температурных условий в активной зоне. Все страны ориентируются на смешанное окисное топливо. В связи с возрастающей ролью операции перегрузки топлива в реакторах большой мощности предусматривается усовершенствование соответствующих систем. Страны, ориентирующиеся на замкнутый топливный цикл, планируют строительство предприятий по изготовлению и переработке топлива. В частности, во Франции предполагается сооружение завода по изготовлению топлива производительностью 100 т/год, в ФРГ — завода по переработке топлива производительностью 1500 т/год.

Первые коммерческие установки с быстрыми реакторами

Таблица 4

Страна	Установка	Мощность, МВт (эл.)	Предполагаемый пуск
Великобритания	CDFR	1320	Начало строительства в 1982 г.
СССР	БН-1600	1600	Строительство начнется после получения опыта эксплуатации БН-600
Франция	Super Phenix	1200	1983 г.
ФРГ		1300	
Япония	«Demo»	1000—1500	Начало строительства после годичной эксплуатации SNR-300 1992 г.

Количество единиц оборудования в реакторах

Таблица 5

Название	PFR	CDFR
Тепловыделяющая сборка	78	342
Петля второго контура	3	8
Испаритель	3	16
Перегреватель	3	16
Турбина	1	2

Важным для многих стран является получение лицензий на строительство АЭС с быстрыми реакторами. При этом считается первоочередной разработкой технически обоснованных требований безопасности. Продолжаются научно-исследовательские, проектно-конструкторские и экспериментальные работы в обоснование концепций и характеристик АЭС с быстрыми реакторами большой мощности. В области физики это прежде всего связано с изучением возможностей удлинения кампании и увеличения коэффициента воспроизводства. Большое внимание уделяется изучению гетерогенных активных зон, содержащих воспроизводящий материал. Продолжаются работы по уточнению ядерных данных, улучшению вычислительных методов, созданию комплексных (в том числе многомерных) вычислительных кодов, а также интегральные эксперименты на критических сборках.

В области топлива и материалов (в частности, во Франции) исследуются явления, ограничивающие продолжительность работы твэлов, в особенности химическое взаимодействие топлива с оболочкой; возможности нанесения защитных покрытий на внутреннюю поверхность оболочки и введения в топливо стабилизирующих присадок; свойства нержавеющей стали 316, стабилизированной титаном; карбидное топливо.

В области безопасности наиболее важным является накопление опыта эксплуатации действующих установок, усовершенствование систем контроля за их безопасной эксплуатацией и получение доказательств того, что даже «почти невозможные» гипотетические аварии не будут иметь тяжелых последствий для населения и окружающей среды. В последнем случае речь идет не о проведении глобальных экспериментов, а о разработке приемлемых расчетных программ и их доступной проверке.

Значения масштабированных факторов для некоторых параметров при переходе от PFR к CDFR

Таблица 6

Параметр	Фактор
Электрическая мощность	×5,3
Диаметр бака первого контура	×1,9
Длина тепловыделяющей сборки	×1,1
Мощность тепловыделяющей сборки	×1,1
Расход насоса первого контура	×2,5
Мощность:	
промежуточного теплообменника	×4,0
испарителя	×1,3
перегревателя	×1,0

Международное сотрудничество является важной составной частью развития программ по быстрым реакторам, особенно в европейских странах. В 1972 г. три европейские промышленные компании (западногерманская RWE, бельгийская EN и датская SEP) образовали субсидируемую компанию SBK для заказа и эксплуатации SNR-300 в Калкаре. По договору 1973 г. SBK вошла в более широкое европейское объединение с французской EdF и итальянской ENEL, образовав две компании NERSA (EdF 51%, ENEL 33%, SBK 16%) и ESK (SBK 51%, ENEL 33%, EdF 16%) для заказа и эксплуатации соответственно Super Phenix во Франции и SNR-2 в ФРГ. Для строительства SNR-300 в 1972 г. образована INB, в которой объединили усилия INTERATOM, Neratoom и «Belgouiseleaire». Важные соглашения заключены между ФРГ и Францией, в соответствии с которыми опыт в области быстрых реакторов, накопленный ФРГ и ее партнерами, а также Францией, будет сконцентрирован в компании SERENA. INB и NOVATOME (Франция) будут строить АЭС с быстрыми реакторами по лицензиям этой компании. Начиная с SNR-2 и Super Phenix-2 быстрые реакторы будут проектироваться и строиться совместно INB и NOVATOME. С 1974 г. имеется тесное сотрудничество между Францией и Италией, которое, в частности, касается работ по сооружению Super Phenix и созданию исследовательского центра в Бразилоне (Италия) с PEC.

Американская программа по быстрым реакторам. В настоящее время США в отношении развития ядерной энергетики ориентируются на необходимость использования АЭС с LWR для удовлетворения потребностей в электроэнергии, откладывая на неопределенный срок реализацию национальных программ строительства коммерческих быстрых реакторов и предприятий по переработке ядерного топлива.

В связи с новым подходом правительства прекращено финансирование проекта этапной установки CRBRR. Однако промышленными фирмами будут завершены проекты систем этого реактора, изготовлены и испытаны прототипы ГЦН и парогенераторов. Электротехнический институт EPRI обратился к проектировщикам PLBR (прототипа коммерческого быстрого реактора мощностью 1000 МВт (эл.) с просьбой закончить разработки и рассмотреть для сравнения возможности баковой компоновки оборудования первого контура. Модели теплообменников PLBR мощностью по 70 МВт в двух вариантах (одно- и двухстеночная концепция) проектируются и будут испытаны на стенде SCTI в Конструкторском центре по жидким металлам. Департамент энергетики запросил согласие конгресса США рассмотреть проект АЭС с быстрым реактором мощностью 650 МВт (эл.).

В 1978 г. на программу по быстрым реакторам предусмотрены ассигнования в размере 483 млн. долл., что превышает ежегодные ассигнования в 1975—1976 гг. Это может означать только то, что еще более значительные усилия будут направлены на осуществление основных исследовательских программ по быстрым реакторам, в том числе на разработку концепций установок, наиболее защищенных от распространения ядерного оружия.

В настоящее время основные усилия США в области быстрых реакторов связаны с завершением строительства FFTF. К концу 1977 г. оно было закончено на 95%. По плану заполнение системы натрием должно быть закончено в августе 1978 г. Выход на критическую предполагается в августе 1979 г., выход на мощность — к февралю 1980 г.

АРИФМЕТЧИКОВ Е. Ф.