

# Разработки по быстрым реакторам

В. Ефименко, Ф.А. О'Хара и Г.Ю. Лауэ

В настоящее время ведутся разработки в основном быстрых реакторов-бридеров (БРБ) с жидкометаллическим теплоносителем. Почти двенадцать стран осуществляют важные исследовательские и промышленные программы, связанные с коммерческим применением БРБ. Еще около десяти стран участвуют в разработке компонентов БРБ или осуществляют исследования и разработки по быстрым реакторам.

Разработки БРБ были начаты более 35 лет тому назад. За этот период, кроме множества быстрых реакторов нулевой мощности, было построено и эксплуатировалось 19 БРБ. В таблице приводятся некоторые из этих реакторов.

В настоящее время 10 БРБ эксплуатируются, 5 сооружаются и 5 находятся на стадии планирования. Накоплен опыт эксплуатации БРБ более 170 реакторо-лет\*.

Большие капиталовложения и значительные трудовые ресурсы были использованы во всем мире для разработки быстрых бридеров, чтобы обеспечить необходимый переход от существующих тепловых реакторов с однократным топливным циклом.

Существующая ныне технология ядерной энергетики может считаться только относительно кратковременным источником энергии, так как известные в настоящее время запасы урана будут исчерпаны за период около 50 лет. Однако при бридерах деление ядер предлагает почти неисчерпаемый источник энергии, так как они могут использовать в 60–70 раз больше энергии, чем содержится в единице массы урана. Кроме того, бридеры приведут к увеличению доступных запасов урана вследствие их способности экономично использовать менее концентрированные руды.

## Противоположные тенденции

Общая концепция размножения топлива была впервые экспериментально доказана на БРБ в Великобритании, СССР и США. Для испытания топлива, конструкционных материалов и реакторных компонентов были сооружены улучшенные БРБ. В

Г.Ю. Лауэ — директор Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ. В. Ефименко и Ф.А. О'Хара — сотрудники этого Отдела.

\* См. „Состояние быстрых реакторов-размножителей с жидкометаллическим теплоносителем“, Серия технических отчетов МАГАТЭ, Международное агентство по атомной энергии, Вена, Австрия (будет опубликовано в 1985 г.).

## Действующие, сооружаемые и планируемые быстрые реакторы-бридеры

| Страна             | Название блока | Мощность, МВт (тепл.) / МВт (эл.) | Год пуска |
|--------------------|----------------|-----------------------------------|-----------|
| <i>Действующие</i> |                |                                   |           |
| США                | EBR-II         | 62.5/20.0                         | 1963      |
| СССР               | БОР-60         | 60/12                             | 1969      |
| СССР               | БН-350         | 1000/150*                         | 1972      |
| Франция            | Феникс         | 605/270**                         | 1973      |
| СССР               | БР-10***       | 10/0                              | 1973      |
| Великобритания     | PFR            | 670/250                           | 1974      |
| ФРГ                | KNK-II         | 58/21                             | 1977      |
| Япония             | Джойо          | 100/—                             | 1977      |
| СССР               | БН-600         | 1470/600                          | 1980      |
| США                | FFTF           | 400/—                             | 1980      |
| <i>Сооружаемые</i> |                |                                   |           |
| Франция            | Суперфеникс I  | 3000/1242                         | 1985      |
| ФРГ                | SNR-300        | 762/327                           | 1986      |
| Индия              | FBTR           | 42/15                             | 1985      |
| Италия             | PEC            | 118/—                             | 1989      |
| Япония             | Монджю         | 714/280                           | 1991      |
| <i>Планируемые</i> |                |                                   |           |
| Франция            | Суперфеникс II | 3600/1500                         |           |
| ФРГ                | SNR-2          | 3420/1300                         |           |
| Индия              | PFBR           | 1250/500                          |           |
| Япония             | DFBR           | 2550/1000                         |           |
| СССР               | БН-800         | 2100/800                          |           |
| СССР               | БН-1600        | 4200/1600                         |           |
| Великобритания     | CDFR           | 3300/1250                         |           |

\* 150 МВт (эл.) + 1200 м<sup>3</sup>/сут. обессоленной воды.

\*\* Проектный уровень мощности был 568/250. Хорошие параметры и аккуратное обращение с топливом позволили увеличить мощность без изменения установки.

\*\*\* Первоначально БР-5 (5 МВт (тепл.)), который был введен в эксплуатацию в 1958 г.

начале 70-х годов три прототипных реактора были пущены в эксплуатацию во Франции, Великобритании и СССР. На них был накоплен опыт эксплуатации около 30 реакторо-лет.

Советский реактор полупромышленного типа БН-600 успешно эксплуатируется почти пять лет. В 1983 г. коэффициент использования мощности на этом реакторе был равен 72 % при коэффициенте готовности 77 %. Вскоре ожидается начало соору-

жения в СССР реактора БН-800, начало эксплуатации которого планируется после 1990 г.

Коммерческий реактор Суперфеникс I во Франции почти готов, начало его эксплуатации намечено на 1985 г. Сооружаются еще два прототипных реактора — SNR-300 в ФРГ и Мондзю в Японии.

Однако этот оптимистический обзор представляет только одну сторону картины. В настоящее время не ожидается, что коммерческое внедрение БРБ будет происходить в 80-е и 90-е годы так быстро, как предполагалось 10 или 15 лет назад. В некоторых странах сооружение даже менее крупных прототипных быстрых реакторов сталкивается с политическими, финансовыми, лицензионными и другими трудностями.

В США в прошлом году отказались от сооружения реактора-бридера Клич Ривер мощностью 380 МВт (эл.). Это произошло после начала подготовки площадки, при завершении проекта более чем на 95 %, и связанных с ним исследований и разработок более чем на 98 %, при существенных успехах в деле изготовления и испытания компонентов и при наличии компонентов (изготовленных или заказанных) стоимостью около двух третей общей стоимости закупок по проекту. Последние решения свидетельствуют о том, что будущие станции лучше строить как полностью частные предприятия без какого-либо участия правительства.

В ФРГ государственные исследования, а также изменения, особенно по требованиям критериев безопасности для SNR-300, вызвали значительную задержку сооружения станции. Ожидается, что станция будет введена в эксплуатацию в 1986 г. Задержки вызвали значительное увеличение стоимости, так как сооружение станции началось в 1973 г.

В Японии сооружение коммерческих быстрых реакторов отсрочено до 2010 г., хотя ранее планировалось сооружение серии из 10 коммерческих станций, по одной ежегодно, с 1995 по 2005 г.

От чего же зависит такое несоответствие между планами и успешными результатами? Для лучшего понимания существующей ныне ситуации необходимо рассмотреть технические характеристики БРБ, современный их уровень и ожидаемые тенденции их разработки.

### Современное техническое состояние

За последние 40 лет значительный прогресс был достигнут в области физики, техники безопасности, изготовления топлива и топливного цикла БРБ. Основываясь на накопленном опыте эксплуатации, можно сказать, что технология БРБ проверена.

Разработаны расчетные методы и ядерные константы для проектирования активной зоны. Во многих странах получено огромное количество экспериментальной и теоретической информации по нейтронным сечениям, необходимой для физических расчетов БРБ, обмен которой осуществлялся через такие международные организации, как

МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития. По основным параметрам физики реактора и активной зоны достигнутая точность расчетов весьма близка к той, которая необходима для соответствующих прогнозов и оценок.

В результате проработок было испытано несколько вариантов БРБ. Для современных проектов в настоящее время предпочтительным считается вариант со смешанным окисным топливом и натриевым теплоносителем. Для БРБ получили широкое распространение два основных проектных решения — интегральная компоновка и петлевая компоновка (см. рис. 1). По каждому из них накоплен значительный опыт. Подробное описание преимуществ каждого решения выходит за рамки данной статьи. Однако в литературе можно найти множество аргументов в защиту каждого из них\*.

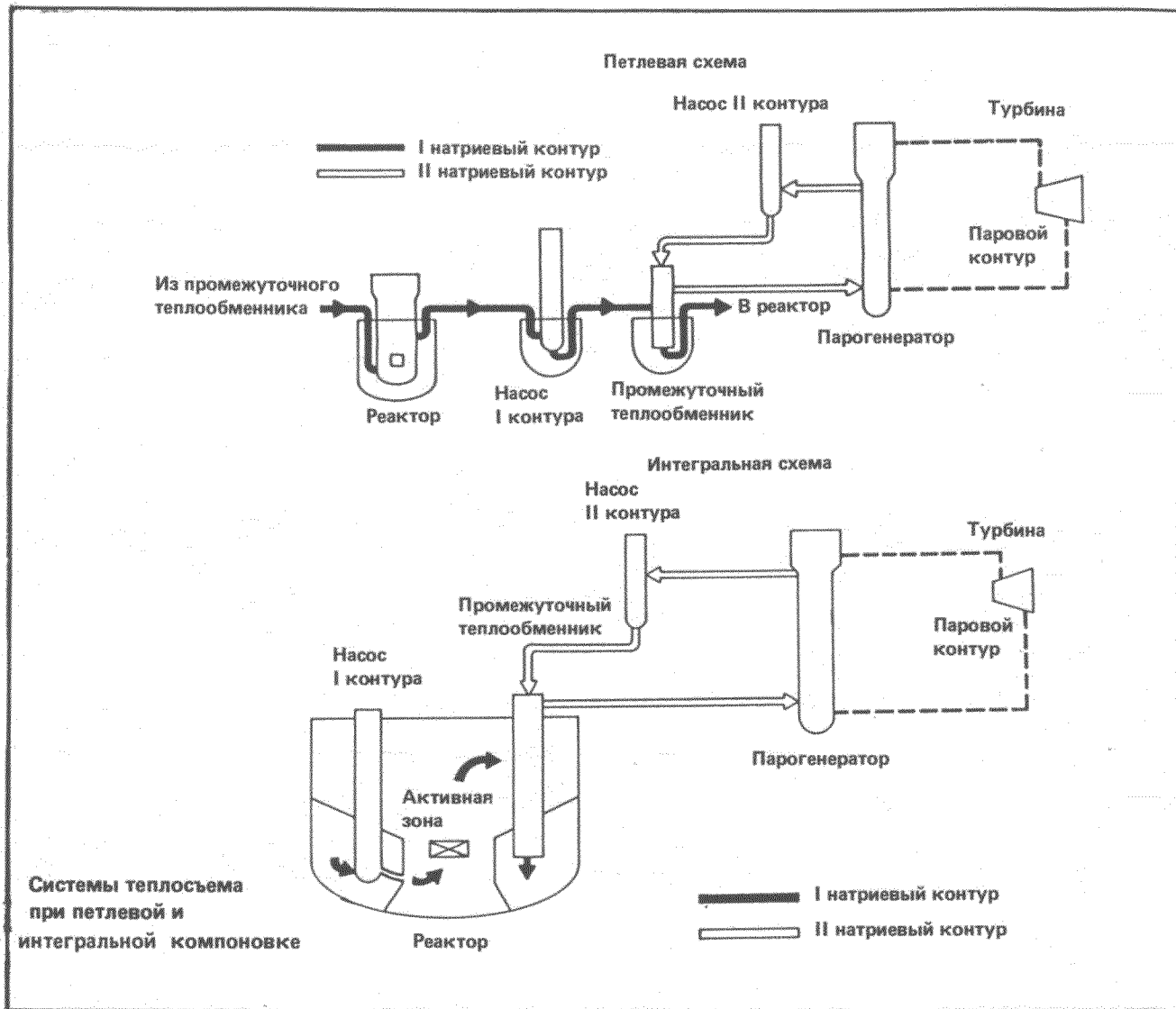
Результаты оптимизации проектных параметров активной зоны и станции, учитывающие граничные условия и свойства натрия как теплоносителя, нашли отражение в основных характеристиках, типичных для прототипных и коммерческих станций с БРБ. Как в петлевом, так и в интегральном реакторе применяется трехконтурная система теплоотвода, состоящая из первого контура, содержащего радиоактивный натрий, нагреваемый в активной зоне, второго (или промежуточного) контура с нерадиоактивным натрием и третьего контура с водой, производящего пар для выработки электроэнергии в системе турбогенератора.

Обычно активная зона имеет высоту около одного метра и диаметр до четырех метров. Урановая зона воспроизводства окружает активную зону. Температура теплоносителя на входе в активную зону равна 300–400 °С, а на выходе из активной зоны — 500–550 °С. Это приводит к более высокому КПД (около 40 %), чем у водородных реакторов под давлением. В активной зоне обычно существуют две зоны с разным обогащением, в которых находится от 100 до 400 гексагональных топливных сборок. В каждой топливной сборке содержится несколько сот топливных стержней внешним диаметром от пяти до девяти миллиметров.

Накоплен обширный опыт по поведению компонентов, включая корпуса реакторов, трубопроводы, натриевые насосы, промежуточные теплообменники, парогенераторы, перегрузочное оборудование и вспомогательные системы. Одна техническая проблема ранних проработок БРБ — протечки в парогенераторе воды в натрий — является бедой всех трех прототипных станций.

Однако улучшение конструкции парогенератора, применение защитных устройств, лучшее понимание возникающих при течах явлений и большие успехи в разработке процедур ремонта в настоящее время обеспечивают не только меньшее количество течей в парогенераторах, но и более быстрый пуск стан-

\* См. Ринейский А.А. „Сравнение технических и экономических характеристик АЭС с современными тепловыми и быстрыми реакторами“, Атомная энергия, т. 53 (декабрь 1982 г.), с. 360–367.



ций после ремонта течи. Таким образом, результаты разработок парогенераторов для БРБ свидетельствуют в настоящее время о том, что на будущих станциях взаимодействие воды с натрием будет сведено к минимуму.

В настоящее время смешанное окисное топливо является стандартным проектным решением почти для всех экспериментальных реакторов и для всех прототипных и демонстрационных реакторов. Оно обычно применяется в форме цилиндрических таблеток в заполненных гелием оболочках из нержавеющей стали. При такой конфигурации и применении аустенитной нержавеющей стали в качестве оболочки и трубчатого чехла в рамках обширных программ облучения были достигнуты большие уровни глубины выгорания топлива.

Например, на прототипном реакторе Феникс максимальное выгорание около 12 % (более 100 тыс. МВт-суток на тонну) было достигнуто для одной (неэкспериментальной) топливной сборки, а глубина выгорания 80 тыс. МВт-суток на тонну

была достигнута почти для 4000 стержней\*. На испытательных реакторах на многих экспериментальных топливных стержнях было достигнуто выгорание до 20 % без их повреждения. Другие типы топлива (металлическое, карбидное) и конструкционные материалы еще прорабатываются.

Во время разработок БРБ ряд вопросов вызывал беспокойство с точки зрения безопасности, в том числе быстрое вскипание теплоносителя (или другие случаи потери теплоносителя) и уплотнение активной зоны. Однако превосходные свойства натрия как теплоносителя обеспечивают хороший отвод остаточного тепла даже при аварийных условиях. Таким образом, аварии со значительным расплавлением активной зоны чрезвычайно маловероятны.

\* См. Benoist, E., Champeix, L., Le développement des réacteurs à neutrons rapides en France de février 1983 à février 1984, *Status of National Programmes on Fast Breeder Reactors*, TWGFR-52, International Atomic Energy Agency, Vienna (1984) pp. 108-123.

В результате анализ аварий исторически направлен на достаточно невероятные, так называемые, гипотетические аварии. Существующий подход (1982–1983 гг.) основан на требовании проектировать БРБ с тем же уровнем безопасности (измеряемым в терминах риска от аварий), что и реакторы PWR той же мощности и того же года сооружения.

В результате интенсивных работ по анализу риска немецкого реактора SNR-300 пришли к выводу, что для SNR-300 вероятность крупных аварий и их последствия не хуже, чем для реактора PWR\*. Это подтверждает, что на БРБ уже достигнут уровень безопасности, сравнимый с уровнями безопасности реакторов PWR.

Несмотря на доказанную технологическую возможность БРБ, их коммерческое внедрение на энергетическом рынке определяется главным образом их экономическими перспективами. Высокие капитальные затраты вносят существенную часть в стоимость вырабатываемой на БРБ электроэнергии. Сравнение капитальных затрат на советские реакторы БН-600 (типа БРБ) и ВВЭР-1000 (типа PWR) свидетельствует о том, что при одних и тех же условиях удельные капитальные затраты на 30–50 % выше для современных БРБ, чем для PWR\*\*.

Основная причина заключается в большем количестве высококачественной стали, используемой только для реактора (корпус реактора, активная зона, насосы первого контура, теплообменники и т.д.) в проектах БРБ 60-х и начала 70-х годов. В настоящее время существуют значительные возможности для уменьшения количества и иногда снижения требований к качеству металлов, необходимых для БРБ, и таким образом снижения капитальных затрат.

Однако еще существуют значительные отличия, которые следовало бы скомпенсировать более низкими стоимостями топливного цикла для БРБ. Стоимость производимой на БРБ энергии едва зависит от стоимости естественного урана, но зависит от стоимости переработки и повторного изготовления топлива. Переработка топлива БРБ была продемонстрирована в опытных и полупромышленном масштабах, но еще требуется демонстрация в коммерческом масштабе с годовой переработкой, по крайней мере, 250 т тяжелого металла (что соответствует мощностям до 10 ГВт (эл.) или 7–9 станциям Суперфеникс).

Коммерческое использование БРБ зависит, главным образом, от их экономики в сравнении с экономикой PWR. Вследствие снижения темпов раз-

вития ядерной энергетики время, когда могли бы широко применяться БРБ, отодвинулось на несколько десятилетий по сравнению со сроками, предсказываемыми 20 лет назад.

#### Тенденции развития

Первые прототипные и демонстрационные станции с БРБ проектировались или вводились в эксплуатацию в условиях, когда цены на уран только начали возрастать или были на высоком уровне. В то время ожидалось, что цены на уран будут продолжать подниматься и БРБ даже при высоких капитальных затратах, очевидно, смогут конкурировать с легководными реакторами.

Теперь стало ясно, что не следовало полагаться, что рост цен на уран компенсирует высокие капитальные затраты на БРБ. В настоящее время значительные усилия разработчиков направлены на уменьшение капитальных затрат, и для этого существует достаточно возможностей.

Первые шаги в этом направлении были сделаны для советского реактора БН-800 и французского реактора Суперфеникс II. Каждый из проектов считается головным в серии, и в ближайшем будущем начнется строительство обоих реакторов. В каждом из проектов реакторов мощность увеличена без увеличения размера и капитальных затрат по сравнению с этими параметрами для их предшественников — БН-600 и Суперфеникс I.

В БН-800 основные изменения произведены в активной зоне реактора и в пароводяном контуре без изменения других частей станции. Увеличение объема активной зоны, уменьшение числа модулей в парогенераторе, уменьшение числа турбогенераторов с трех до одного привело к увеличению электрической мощности с 600 до 800 МВт при тех же капитальных затратах.

В реакторе Суперфеникс II электрическая мощность была увеличена с 1200 до 1500 МВт, при этом ожидается даже снижение капитальных затрат на станцию. Это было достигнуто прежде всего за счет уменьшения диаметра основного корпуса реактора, сокращения длины трубопроводов второго контура и других изменений.

Пути снижения капитальных затрат на БРБ исследуются также в Японии для реактора DFBR-1000, в Великобритании — для CDFR и в США. Целью исследований является повышение экономичности БРБ без ущерба для безопасности и надежности. Основные направления усовершенствований включают оптимизацию конструкции активной зоны для уменьшения размера корпуса реактора, оптимизацию основной системы теплосъема и общей компоновки станции для уменьшения габаритов реактора и вспомогательных зданий, а также применение улучшенных методов сооружения.

Во всех странах, разрабатывающих БРБ, ожидается дальнейшее снижение капитальных затрат. Они могут быть достигнуты путем стандартизации станции, отказа от избыточных требований, применения новейших технологий и изменением концепций.

\* Risiko-orientierte Analyse zum SNR-300, Gesellschaft für Reaktorsicherheit, GRS-51 (1982). See also, Bayer, A., Koeberlein, K., "Risk-oriented Analysis on the German Prototype Fast Breeder Reactor SNR-300", *Nuclear Safety* 25, 1 (1984) pp. 19–32.

\*\* См. Ринейский А.А. „Сравнение технических и экономических характеристик АЭС с современными тепловыми и быстрыми реакторами“, *Атомная энергия*, т. 53 (декабрь 1982 г.), с. 360–367.



Быстрый реактор-бридер Суперфеникс, сооружение которого почти закончено в Крейс-Малвил, Франция, начало эксплуатации запланировано на 1985 г. (Фотографии любезно предоставлены EDF).



Это позволяет реально надеяться, что изменения в проекте, сооружении и эксплуатации бридерных систем снизят в начале следующего века стоимость электроэнергии до уровня, на 10–15 % превышающего эту стоимость на PWR.

Современные тенденции в программах облучения топлива БРБ также обнадеживающие. Заданное выгорание на уровне 10 % тяжелых атомов (примерно 100 тыс. МВт-сут./т) было достигнуто на прототипных станциях (Феникс, PFR) и экспериментальных реакторах (FFTF). Для будущих реакторов (например, CDFR Суперфеникс II) предусматривается глубина выгорания 15–20 %\*. Такая повышенная глубина выгорания в БРБ даст значительную экономию за счет снижения стоимости топливного цикла.

Накопленный в области топливного цикла опыт содержит достаточное количество данных для реалистических оценок капитальных затрат на перерабатывающие предприятия. Оценки, полученные в Великобритании в 1983 г., свидетельствуют о том, что перерабатывающий завод мощностью 50 т тяжелого металла в год, достаточный для переработки топлива трех быстрых реакторов, стоил бы менее 5 % от общих капиталовложений, необходимых для

реактора и связанного с ним полного топливного цикла\*.

Несмотря на изменения планов внедрения БРБ в последние 15 лет, необходимость в их перспективном применении еще остается под вопросом. Положение по их техническим параметрам и аспектам безопасности благоприятно. Значительные успехи достигнуты в технической области, тогда как экономика остается еще главным препятствием. Международные совместные усилия могут внести свой вклад в решение этой проблемы, подобно тому, как это делается по многим другим техническим проблемам.

Выход быстрых реакторов-бридеров на рынок осложняется их долгими и дорогими проработками, необходимостью замкнутого топливного цикла и, кроме того, недавний спад энергетических потребностей в промышленно развитых странах вызывает сомнение, что они могут потребоваться в ближайшие 20–25 лет.

Это частично объясняет существование трех точек зрения: чрезмерного энтузиазма, безразличия и почти отрицания, которые можно обнаружить в странах, вовлеченных в проработки быстрых реакторов-бридеров.

\* См. Anderson, R.G., UK Overview Paper, "IWGFR Meeting on Predictions and Experience of Core Distortion Behaviour", 1–4 октября 1984 г., Манчестер, Великобритания (должно быть опубликовано) и Bernard, A., and Van Dorsse-laere, J.P., "General Presentation of the Core Mechanical Behaviour Approach in France", IWGFR Meeting on Predictions and Experience of Core Distortion Behaviour, 1–4 октября 1984 г., Манчестер, Великобритания (должно быть опубликовано).

\* Smith, R.D., "A Review of the UK Fast Reactor Programme", March 1984, in *Status of National Programmes on Fast Breeder Reactors*, TWGFR-52, International Atomic Energy Agency, Vienna (1984) pp. 77–107. Март 1984 г., в сборнике „Состояние национальных программ по быстрым реакторам-бридерам“, TWGFR-52, МАГАТЭ, Вена (1984 г.), с. 77–107.

## Международное сотрудничество по быстрым реакторам: объединение усилий

Международное сотрудничество было отличительным признаком программ по разработке быстрых реакторов-бридеров. Возможно, нет другой такой области исследований, в которой бы международное сотрудничество было таким успешным, как в случае БРБ.

В целях содействия международному сотрудничеству, обмену технической информацией и координации деятельности в этой области МАГАТЭ образовало в 1967 г. Международную рабочую группу по быстрым реакторам (IWGFR). После этого МАГАТЭ самостоятельно провело

по быстрым реакторам более 80 конференций, симпозиумов, технических комитетов и совещаний специалистов. Сотрудничество принимает формы от открытого обмена информацией на многочисленных международных заседаниях до совместных проектов, таких как SEFOR, совместные программы ФРГ, Бельгии и Голландии; консорциум, задуманный для реактора Суперфеникс и впоследствии преобразованный в группу ARGO; соглашения в рамках Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ)

## Западная Европа

В 1977 г. Франция подписала основные соглашения с ФРГ, Бельгией и Нидерландами (DeBeNe) о совместных работах по новой технологии для ядерных паропроизводящих систем БРБ, разработки топливных элементов и по проектированию. Центральное место в этих разработках и по продаже коммерческих бридеров в будущем занимает организация, известная под названием SERENA, которая была основана в 1978 г. и является единственной компанией континентальной Западной Европы по выпуску лицензий для будущих станций с бридерами для Франции, ФРГ и других стран. В настоящее время есть возможности для лучшей координации и сотрудничества европейских стран в сооружении запланированных в этих странах трех коммерческих станций.

В рамках этих соглашений научно-исследовательская деятельность Франции и ФРГ согласовывается с 1977 г. организационным комитетом и девятью специализированными рабочими группами, деятельность которых дополняется продолжающимся обменом информацией и совместной деятельностью.

С августа 1983 г. действует расширенная западно-европейская исследовательская группа по ядерным системам на быстрых нейтронах. Эта группа, известная как ARGO, намерена продвинуть вперед развитие БРБ настолько, чтобы они могли внести вклад в обеспечение Европы источниками энергии. Кроме Франции, в состав группы первоначально вошли Бельгия, ФРГ, Италия и Нидерланды. В соответствии с подписанным в январе 1984 г. в Париже межправительственным меморандумом, в состав Европейской группы по быстрым реакторам вошла Великобритания. Эта группа открыта для приема других членов.

В феврале 1984 г. Управление электропромышленности Франции (EDF) и национальная организация Великобритании, Центральное управление электроэнергетики

(CEGB) подписали в Лондоне соглашение о совместных работах по атомным электростанциям с быстрыми реакторами с возможным долевым участием CEGB в проекте Суперфеникс II.

В соответствии с меморандумом о взаимопонимании, заключенным в Лондоне 2 марта 1984 г., промышленные компании и исследовательские организации Бельгии, ФРГ, Франции, Великобритании и Италии объединили свои действия, связанные с разработкой и сооружением БРБ. Предполагается также участие партнеров из Нидерландов. Очевидной целью сотрудничества, как записано в Мартовском меморандуме, является наиболее эффективное использование ресурсов, ведущее к ускорению внедрения экономических быстрых реакторов.

Целью всестороннего обмена информацией является выработка последовательной программы сооружения демонстрационных реакторов в Европе и снабжение электроэнергетических компаний информацией, необходимой для дальнейшего перехода к программе сооружения полномасштабного коммерческого реактора. В каждом демонстрационном реакторе учитывался бы соответствующий опыт его предшественника, что привело бы путем непрерывных улучшений к коммерческой модели реактора, на которую могли бы ориентироваться национальные проекты. В свою очередь, каждый реактор выявил бы направления исследования, развития и проектной деятельности для всех участников.

В дополнение к этому вовлеченные в топливный цикл британские и французские организации также подписали в марте 1984 г. два меморандума, устанавливающие принципы сотрудничества в области изготовления топлива и его переработки. Ведутся переговоры по распространению действия этих соглашений и на другие страны, вовлеченные в сотрудничество по быстрым реакторам.

## Восточная Европа

Сотрудничество в Восточной Европе началось в 1980 г., когда страны — члены СЭВ подписали соглашение о сотрудничестве в деле разработки быстрого реактора-бридера большой мощности. В соответствии с программой научно-технического сотрудничества совместные исследования выполняются по вопросам физики реакторов, конструкций активной зоны, теплогидравлики, разработки компонентов реактора и контрольно-измерительной аппаратуры, безопасности быстрых реакторов и топливному циклу быстрых реакторов.

В качестве экспериментальной базы для совместных работ используются лаборатории и установки различных стран. Среди них критические сборки ГДР, Румынии и СССР; теплогидравлические стенды Чехословакии, ГДР и СССР; быстрые реакторы-размножители БОР-60 и БН-350 в СССР.

Контрольно-измерительная аппаратура для БРБ разрабатывается научно-исследовательскими организациями Че-

хословакии, ГДР, Венгрии, Польши и СССР с ее испытанием в реакторах БОР-60 и БН-350. Различные проекты парогенераторов для БРБ, разработанные в Чехословакии, были успешно испытаны на реакторе БОР-60. Проект парогенератора и его защитных клапанных устройств для БРБ большой мощности разрабатывается совместно специалистами Чехословакии и СССР.

Оборудование для переработки топлива быстрых реакторов и контрольно-измерительное оборудование для перерабатывающих заводов разрабатывается в Чехословакии, ГДР, Польше и СССР. В результате совместных исследований по оптимизации переработки топлива был сделан вывод о том, что оптимальная мощность таких заводов должна быть около 1500 т топлива в год. Этого было бы достаточно для обслуживания атомных электростанций суммарной мощностью 40–50 ГВт (эл.). Кроме водных методов переработки топлива специалистами Чехословакии и СССР разрабатывается безводная технология переработки топлива.

Задержка с коммерческим внедрением БРБ сместила направление исследований на разработку более экономичного проекта станции с БРБ. Теперь есть больше времени. Это означает, что коммерческая станция с БРБ, введенная в эксплуатацию после 2000 г., будет лучше, дешевле и сможет конкурировать с легководными реакторами при более низких ценах на уран, по сравнению с той, какой она была бы коммерчески внедрена в конце 80-х или начале 90-х годов.

Бридер без переработки не является бридером. Таким образом, обязательным условием для возможности применения реакторов-бридеров является замкнутый топливный цикл. Замкнутый топливный цикл для БРБ, особенно переработка топлива, еще нуждается в демонстрации на коммерческом уровне; для оправдания сооружения коммерческого перерабатывающего завода следовало бы иметь в эксплуатации перерабатывающее предприятие на мощность 10 ГВт (эл.) (или 7-8 станций типа Суперфеникс).

Однако в отличие от управляемой ситуации с техническими проблемами состояние с финансированием коммерческой демонстрации БРБ не удовлетворительно. Определенные проблемы просматриваются с долговременными капиталовложениями, особенно в связи с тем, что рынок капиталовложений в основном ориентирован на условие быстрой окупаемости. Это означает, что средства будут только в том случае, если несколько более крупных европейских организаций, например, EDF (Франция), CEBG (Великобритания) и несколько компаний ФРГ объединят ресурсы для финансирования определенной установки.

Недостаток вкладываемых средств является только одним из примеров, побуждающих к объединению усилий путем международного сотрудничества. Как следует из опыта Западной Европы и стран Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ), значительная экономия может быть получена за счет совместных мероприятий. Совместные действия также приводят к положительному эффекту с проектной точки зрения и позволяют обеспечить более широкий рынок для большего числа станций, что необходимо для демонстрации эффекта от серийности продукции.

Международное сотрудничество также позволяет получить экономию на установках топливного цикла, так как определенная установка имела бы большее число обслуживаемых реакторов на начальном этапе. Таким образом, международное сотрудничество во всех этих областях играет важную роль для будущих БРБ.

В странах Европы, которые уже решили согласовать свои усилия, нет сомнения в том, что к концу века в действие вступит несколько быстрых реакторов.

Обращаясь к прежним планам, можно отметить следующее. Суперфеникс I, который должен достичь критичности в 1985 г., будет эксплуатироваться, и на нем можно будет получить достаточный опыт для реактора Суперфеникс II, ввод в строй которого ожидается к середине 90-х годов. В ФРГ создание SNR-2 можно ожидать к 2000 г. Аналогичным образом Великобритания могла бы принять решение о строительстве CDFR с вводом его в строй к концу века. В СССР за реактором БН-600 последует в начале 90-х годов реактор БН-800, открывая серию, возможно, из 20 станций. Соответственно, реактор БН-1600 может вступить в строй после 2000 г. В Японии ожидается завершение сооружения станции Мондзю около 1990 г. и, возможно, более крупного демонстрационного реактора — к 2000 г.

Все эти проекты избавили бы от необходимости немедленного создания установок топливного цикла коммерческого масштаба, отодвигая эту необходимость на некоторый период времени после 2000 г. Однако было бы желательно в качестве подготовки к большим, коммерческого масштаба, установкам создание демонстрационных установок.

В перспективе после 2000 г. может быть заказана серия проверенных к тому времени станций с БРБ и возникнет необходимость в крупномасштабных предприятиях по переработке и изготовлению топлива. Следовательно, крупномасштабное внедрение БРБ следует ожидать тогда, когда будут почти исчерпаны легкодоступные ископаемые ресурсы, что по некоторым оценкам произойдет в начале XXI века. В этом случае БРБ обеспечили бы длительный источник энергии для удовлетворения мировых потребностей в энергии.