

Быстрые реакторы-размножители с жидкометаллическим теплоносителем. Технический и экономический статус

В последние годы был достигнут значительный прогресс в развитии технологии быстрых реакторов-размножителей с жидкометаллическим теплоносителем

Симча Голан, Жан Ледюк и Хироси Накагава

После 40 лет развития и демонстрации технических возможностей быстрых реакторов-размножителей с жидкометаллическим теплоносителем (LMFR) Япония, Западная Европа, Советский Союз и Соединенные Штаты Америки приступили к новому этапу реализации проектов LMFR. В данной статье дается краткий обзор состояния новейшей Технологии LMFR, современные оценки экономической целесообразности, а также выражаются некоторые точки зрения относительно различных перспектив широкомасштабного внедрения LMFR.

Новейшая технология

Опыт эксплуатации экспериментальных и средних энергоблоков с LMFR, равный примерно 200 реакторо-лет, показал что быстрые реакторы-размножители с натриевым теплоносителем так же просты в эксплуатации, как и существующие легководные реакторы (LWR); он продемонстрировал их надежность, простоту технического обслуживания, относительно небольшие дозы облучения персонала, а также минимальное производство радиоактивных отходов во время нормальной эксплуатации, не требующих значительных усилий по обращению с

ними. Особенно ценным представляется опыт эксплуатации прототипных реакторов, например, реактора Феникс мощностью 250 МВт_{эл} во Франции (15 лет), реактора PFR мощностью 250 МВт_{эл} в Великобритании (16 лет), БН-350 в Советском Союзе (16 лет) и реактора FFTF мощностью 400 МВт. В США (10 лет). До последнего времени все эти четыре реактора работали с высокой степенью надежности. Кроме того, уже в течение почти 9 лет в СССР работает реактор БН-600 исключительно в целях коммерческого производства электроэнергии, а в декабре 1986 г. во Франции вышел на полную мощность LMFR Суперфеникс – 1250 МВт_{эл}. Однако в мае 1987 г. в результате разгерметизации внешнего бака для хранения топлива он был остановлен, но в январе 1989 г. после успешного ремонта и изменения эксплуатационных процедур реактор снова был пущен в эксплуатацию.

В некоторых странах глубина выгорания топлива превысила 100 000 МВт-сутки/т, а результаты экспериментов указывают на возможность достижения глубины выгорания свыше 200 000 МВт-сутки/т как для окисного, так и металлического топлива. Глубина выгорания топлива реактора Феникс и PFR составила около 130 000 МВт-сутки/т в условиях, близких к режиму эксплуатации коммерческих LMFR. Франция, Великобритания и США продемонстрировали возможность замыкания значительного по своим масштабам топливного цикла LMFR. Изготовление топлива для реакторов Феникс и Суперфеникс стало базой для накопления большого опыта по производству смешанного окисного топлива во Франции. Кроме того, в течение последних 15 лет в Европе было успешно переработано почти 25 тонн отработавшего окисного топлива, а полученные в результате этого высокоактивные от-

Г-н Голан является управляющим секции ядерно-энергетических систем отдела научных исследований и разработок фирмы Бечтел. Г-н Ледюк занимает пост управляющего по вопросам стратегии и международных связей Новатома, а г-н Накагава является исполнительным директором по вопросам технологических разработок Японской атомноэнергетической компании.

ходы были остеклованы в целях их подготовки к длительному хранению. Значительного прогресса в создании 3-компонентного металлического топлива (U-Pu-Zr) и соответствующей технологии переработки добилась Аргоннская национальная лаборатория (АНЛ) в США. Глубина выгорания топлива в экспериментальных ТВС реактора EBR-2 превысила 185 000 МВт-сутки/т. Большие успехи достигнуты в области пирометаллургической переработки отработавшего металлического топлива, которая позволяет извлекать из него полезные компоненты (уран и плутоний) и отделять продукты деления. Примечательной чертой данного процесса является то, что большинство актинидов сопутствует плутонию на протяжении всего процесса, и поэтому они удаляются из потока отходов. На площадке реактора EBR-2 ведется модификация установок, которая поможет осуществить широкомасштабную демонстрацию возможностей данного топливного цикла к середине 90-х годов, включая изготовление топлива, переработку отработавшего топлива и обращение с радиоактивными отходами.

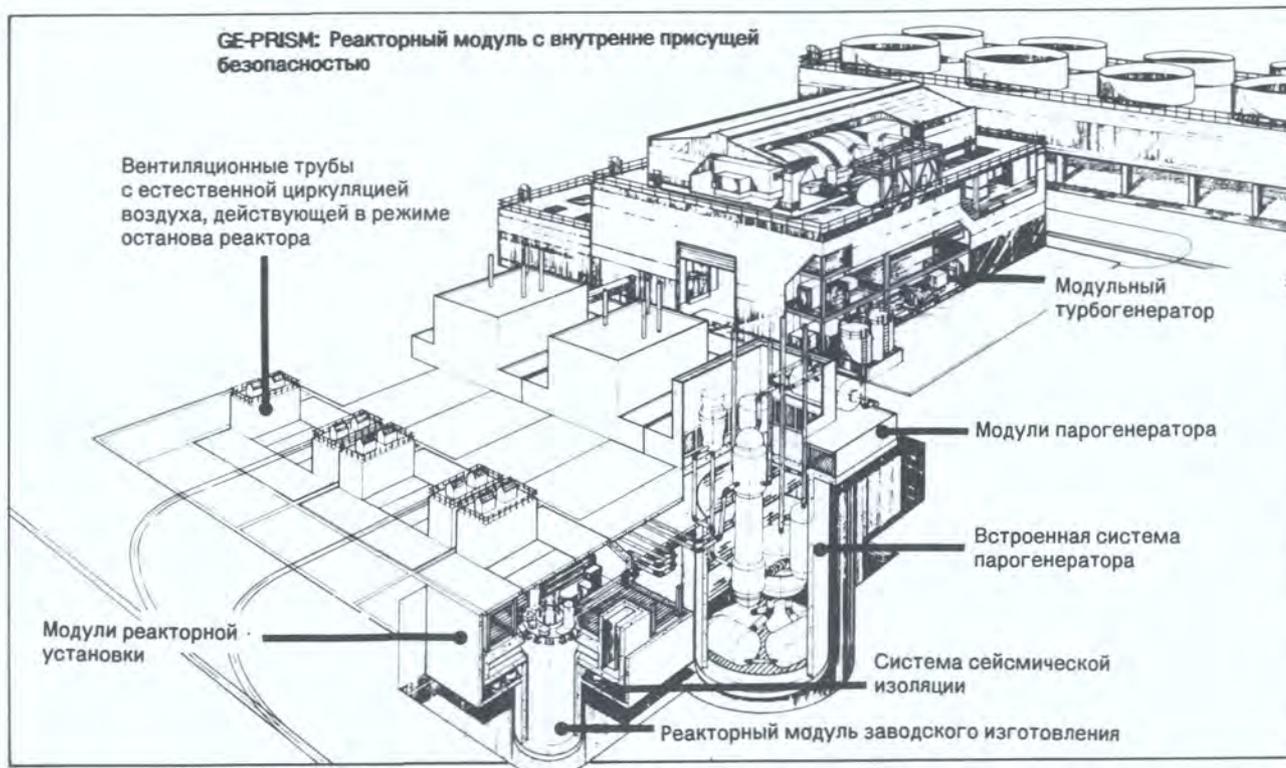
Важно понять, что накопленный до настоящего времени опыт связан в основном с реакторами, пущенными в эксплуатацию до середины 70-х годов, а также с технологией, которая была разработана в 60-х годах и даже ранее. В недавнем прошлом в технологии LMFR был достигнут значительный прогресс, однако эти новые разработки смогут продемонстрировать свои достоинства только в следующем поколении АЭС. Новые направления технического развития реакторных конструкций следующего поколения отражают значительные успехи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также приобретенный в последнее время опыт эксплуатации АЭС. Ключ к решению проблемы заключался в использовании внутренних присущих благоприятных характеристик LMFR для повышения безопасности и максимального уменьшения издержек. Наиболее важными среди них являются, пожалуй, атмосферное давление в контуре теплоносителя реактора, большой запас до начала кипения теплоносителя при рабочих температурах и высокий отрицательный коэффициент реактивности. Эти качества вместе с хорошими температурными характеристиками натрия, возможностью использовать широкий ассортимент материалов, а также с высокой теплоэлектропроводимостью по-прежнему ставят перед конструкторами задачу по созданию более совершенного LMFR.

Недавно после проведения анализа конкурирующих проектов Соединенные Штаты Америки приняли решение сфокусировать внимание на создании небольших (471 МВт_т - 155 МВт_{эл}) модульных реакторов с 3-компонентным металлическим топливом. Модульные реакторы предоставляют больше возможностей с точки зрения изготовления компонентов в заводских условиях и экономии за счет их серийного производства, а также позволяют использовать более простые и пассивные системы обеспечения безопасности и осуществлять более плавное увеличение мощностей производства электроэнергии. Кроме того, 3-компонентный металлический сплав позволяет создавать конструкции активной зоны с более благоприятными характеристиками поведения в аварийных режимах, а также использовать компактные пирометаллурги-

ческие процессы для повторного использования топлива в цикле, что с экономической точки зрения может облегчить замыкание топливного цикла на раннем этапе внедрения LMFR. В отличие от Соединенных Штатов, Япония, Советский Союз и европейские государства в настоящее время идут по более традиционному пути создания крупных (800-1500 МВт_{эл}) монолитных реакторов, использующих в качестве топлива смесь оксидов плутония и урана, считая, что крупные реакторы дают значительную экономию как с точки зрения строительства, так и эксплуатации. Опыт строительства и эксплуатации реактора Суперфеникс указывает на наличие потенциальной возможности значительного сокращения затрат на создание будущих крупных монолитных станций. Технология смешанно-окисного топлива отработана достаточно хорошо и опирается на опыт переработки и изготовления топлива легководных реакторов. Таким образом, в настоящее время имеется несколько подходов к созданию коммерческой промышленности LMFR. Несмотря на различия конкретных конструкций, они обладают аналогичными основными характеристиками, что создает основу для международного сотрудничества.

Соединенные Штаты Америки. Основные усилия в США, ведущую роль в которых играет компания Дженерал Электрик, направлены на создание среднего энергоблока (PRISM), мощность которого путем добавления новых модулей можно довести до уровня более крупных станций. Каждый энергоблок состоит из четырех реакторных модулей мощностью 471 МВт_т, подключенных к одному общему турбогенератору мощностью 465 МВт_{эл}. (см. рисунок). К числу ярких примеров усовершенствованных характеристик такой станции относятся компактные реакторные модули заводского изготовления, которые можно транспортировать по суше; использование 3-компонентного металлического топлива с пирометаллургической переработкой; останов и стабилизация реактора благодаря использованию принципа внутренне присущей безопасности, т.е. способности реагирования на изменение температуры и реактивности, даже в случае гипотетических аварий; пассивные системы отвода остаточного тепла; сейсмоизоляция реактора, обеспечивающая большой запас сейсмостойкости и более высокую гибкость с точки зрения выбора площадки для стандартной станции; защитная оболочка, состоящая из страховочного корпуса вокруг корпуса реактора и крышки реактора с необходимыми патрубками; применение электромагнитных ГЦН вместо механических; отказ от вспомогательных систем охлаждения, зависящих от энергоснабжения, а также от запасных дизель-генераторов, имеющих отношение к обеспечению безопасности; широкое использование в строительстве модулей заводского изготовления; отдельное строительство обычных секций станции и тех, что играют важную роль в обеспечении безопасности; сертификация регулируемыми органами стандартной конструкции, основанная на широкомасштабном предварительном испытании прототипного модуля натуральных размеров с целью выявления его поведения в широком диапазоне нормальных и аварийных режимов

Европа. Основные усилия, главную роль в осуществлении которых играет Европейская группа



электроэнергетических компаний, эксплуатирующих быстрые реакторы-размножители (EUFUG), направлены на разработку энергоблока мощностью 1500 МВт_{эл.} (EFR), который будет отвечать требованиям, предъявляемым к безопасности и экономическим показателям в Великобритании, Франции и Федеративной Республике Германии. Конструкция EFR, в основе которой лежат более ранние конструкции европейских национальных реакторов, например, CDFR, SNR-2 и Суперфеникс-2, разработку которой ведет Ассоциация EFR (Ансальдо, Белгонуллиар, Интератом, Эн-си-си и Новатом), указывает на возможности значительного сокращения издержек, которые позволят сделать этот реактор экономически конкурентоспособным по сравнению с современными европейскими легководными реакторами (см. рисунок). Наиболее характерными примерами параметров реактора EFR, которые вносят свой вклад в его экономический потенциал, являются большая глубина выгорания смешанно-окисного топлива (свыше 150 000 МВт-сутки/т; наличие одного реактора бассейнового типа мощностью 3600 МВт_т с крупным высокопроизводительным оборудованием для переноса тепла (три ГЦН, шесть промежуточных теплообменников, три или шесть петель второго контура); компактная внутренняя защитная оболочка, включающая в себя корпус реактора и крышку, а также цилиндрическое железобетонное здание реактора, представляющее собой внешнюю защитную оболочку; простая система прямого отвода остаточного тепла; шесть промежуточных прямотрубных парогенераторов из ферритной стали; эффективный паротурбинный цикл (490 °С, 185 бар на входе турбины). Предпринимаются значительные усилия по повышению безопасности EFR путем более широкого использования пассивных систем обеспечения безопасности.

Советский Союз. Используя опыт эксплуатации четырех LMFR (БР-10, БОР-60, БН-350 и БН-600), Советский Союз совсем недавно завершил проектирование более крупного быстрого реактора-размножителя с жидкометаллическим теплоносителем БН-800 и приступил к строительству АЭС с такими реакторами на двух площадках: в Белоярске и на Южном Урале. В конструкцию БН-800 было внесено несколько модификаций общего характера, однако в ней также максимально используется оборудование, разработанное для реактора БН-600. Например, несмотря на увеличение размеров активной зоны, корпус реактора БН-800 имеет такие же размеры, что и корпус реактора БН-600. Этого удалось добиться благодаря уменьшению внутрикорпусной защиты на основе эксплуатационного опыта реактора БН-600. В целях улучшения рабочих характеристик парогенераторов температура натрия во втором контуре была несколько снижена по сравнению с температурой в реакторе БН-600 (505 °С и 520 °С соответственно), то же самое касается и температуры пара (490 °С и 505 °С соответственно). Кроме того, в реакторе БН-800 имеется только один турбогенератор. Следующим шагом в развитии конструкции LMFR в Советском Союзе является реактор БН-1600, который считается прототипом будущих коммерческих реакторов. В 1988 г. был проведен анализ этой конструкции и принято решение продолжать ее разработку с целью улучшения характеристик безопасности и повышения экономических показателей.

Япония. Исходя из успешного опыта эксплуатации реактора Джойо (11 лет), а также опыта изготовления и строительства прототипного реактора Монджу мощностью 280 МВт_{эл.}, который должен выйти на критичность предположительно к 1992 г., Японские электроэнергетические компании собираются в скором времени выбрать основные

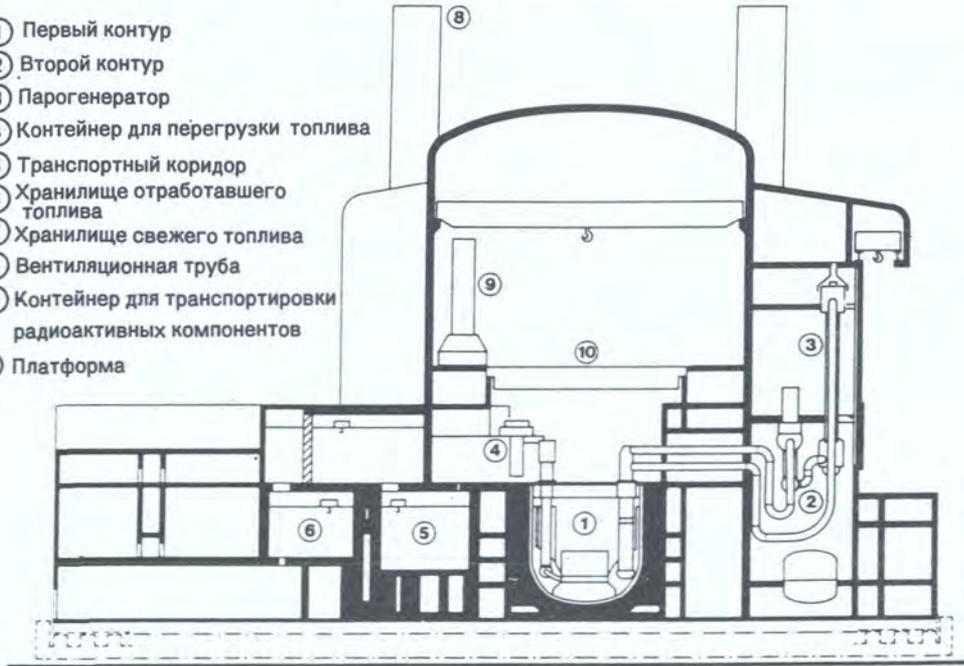
параметры для следующего демонстрационного LMFR, начало строительство которого запланировано на конец 90-х годов. В результате проведения 6-летнего исследования возможностей уменьшения издержек и вспомогательных опытно-конструкторских работ мощность новой станции будет находиться, вероятно, в диапазоне 800–1000 МВт_{эл.}; в нем будет использоваться окисное топливо и прямоточный парогенератор из ферритной стали со спиральной навивкой. Основные решения, которые

еще предстоит принять, касаются выбора между петлевой конструкцией и конструкцией бассейнового типа, системы теплопереноса, а также выбора типа систем обеспечения сейсмостойкости, которые потребуются для удовлетворения высоких требований, предъявляемых в Японии к сейсмической устойчивости конструкций.

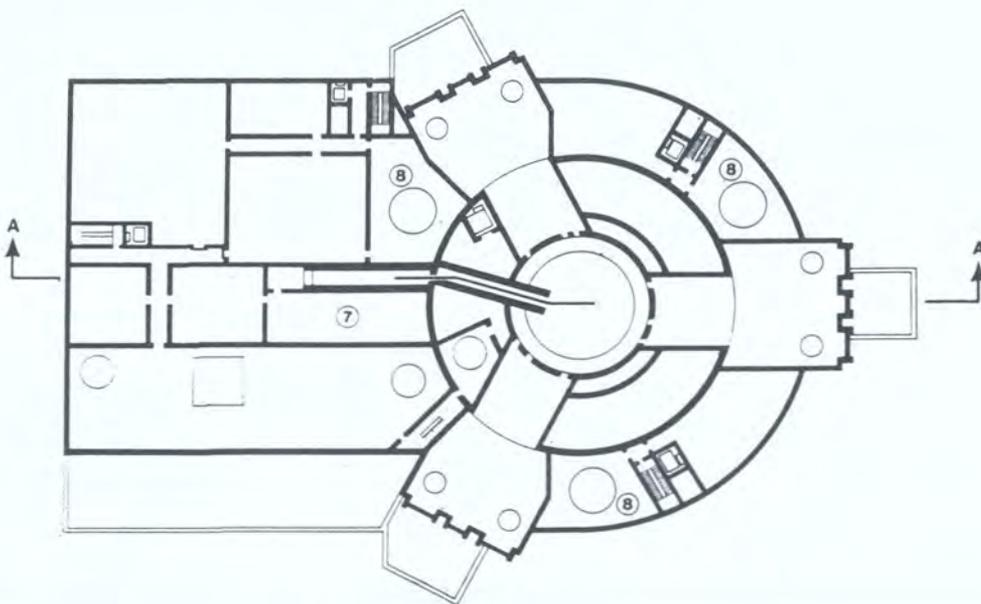
Индия. В Индии экспериментальный быстрый реактор-размножитель (FBTR) достиг критичности в

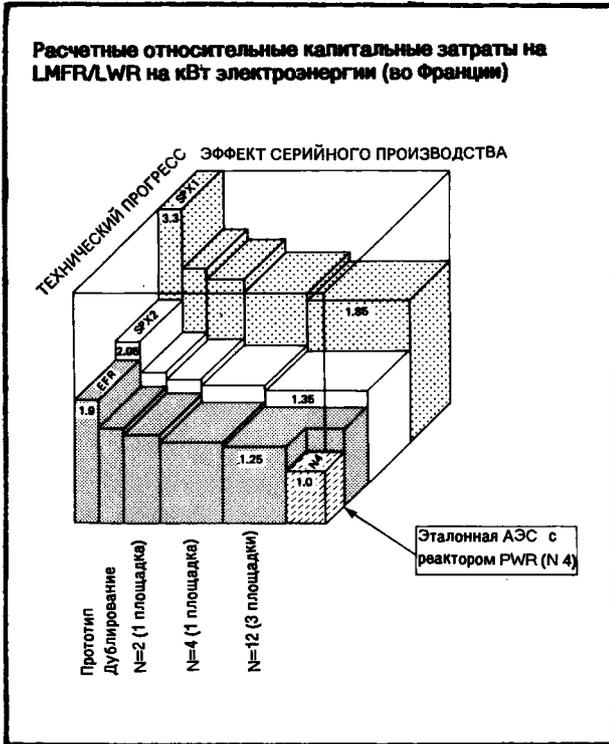
Первая конструкция реактора EFR

- ① Первый контур
- ② Второй контур
- ③ Парогенератор
- ④ Контейнер для перегрузки топлива
- ⑤ Транспортный коридор
- ⑥ Хранилище отработанного топлива
- ⑦ Хранилище свежего топлива
- ⑧ Вентиляционная труба
- ⑨ Контейнер для транспортировки радиоактивных компонентов
- ⑩ Платформа



Сечение A-A





октябре 1985 г. Эксплуатационный опыт этого реактора будет учтен в конструкции прототипа быстрого реактора-размножителя бассейнового типа мощностью 500 МВт_{эл.} (PFBR), концептуальная разработка конструкции которого уже завершена.

Экономическая целесообразность

В основу действующих в настоящее время АЭС с реакторами LMFR, включая Суперфеникс мощностью 1250 МВт_{эл.}, были положены в целом критерии безопасности легководных реакторов с чрезвычайно консервативными коэффициентами безопасности. Новые данные, новые методы расчета, а также использование новых более совершенных конструкций активной зоны позволили разработать критерии безопасности исключительно для LMFR, сделать реакторный блок более компактным, а также упростить вспомогательные системы и конструкции. Использование естественной конвекции для отвода остаточного тепла, расположение важных для безопасности систем в непосредственной близости от реактора, максимальное уменьшение потребностей в энергии, необходимой для обеспечения безопасности, а также широкое использование других благоприятных физических характеристик натрия внесли свой вклад в упрощение конструкции и снижение капитальных затрат. Например, более четкое понимание термогидравлических характеристик натрия после проведения температурных измерений на Суперфениксе позволили применить на реакторе EFR более компактную компоновку с потенциальным 62 %-ным уменьшением металлоемкости первого контура на 1 МВт_{эл.} энергии.

Ключевой проблемой являются ожидаемые капитальные затраты на n-й реактор серии LMFR по сравнению с эквивалентным легководным реактором (см. рисунок, иллюстрирующий современные прогнозы, основанные на опыте строительства и эксплуатации Суперфеникса и на более поздних европейских анализах проектов). В левой колонке этого рисунка указаны усовершенствования, которые можно будет внедрить благодаря техническому прогрессу. Ожидается, что в конструкции EFR по сравнению с Суперфениксом будет значительно снижен вес стальных компонентов и уменьшены объемы бетона на 1 МВт_{эл.} энергии с последующим уменьшением капитальных затрат. Ожидается также, что в случае широкомасштабного внедрения реакторов EFR произойдет дальнейшее снижение стоимости, как это уже случилось в результате реализации Французской программы широкомасштабного внедрения легководных реакторов. Если говорить конкретно о Франции, то по оценкам затраты на n-й реактор в EFR уменьшатся до уровня, превышающего на 25 % уровень затрат на сравнимый с ним усовершенствованный легководный реактор. С другой стороны, ожидается, что благодаря большей глубине выгорания топлива затраты на топливный цикл EFR будут значительно ниже затрат на топливо легководного реактора, даже при весьма умеренных ценах на уран; в результате в случае серийного выпуска LMFR общие издержки производства электроэнергии будут очень близки к соответствующим показателям легководных реакторов.

Проведенные недавно независимые исследования в США и Японии дали аналогичные, а может быть и более обнадеживающие результаты. Для проведения оценок японские электроэнергетические компании использовали методологию, основанную на широком применении компьютеров, которая была разработана в сотрудничестве с опытными американскими фирмами-поставщиками; эта методология использовалась для проведения сравнительного анализа стоимости последних усовершенствованных конструкций LMFR и стоимости конструкций легководных реакторов (см. рисунок, который иллюстрирует тенденции в области капитальных затрат, определенные в ходе последних японских исследований). Эти исследования указывают на возможное соотношение капитальных затрат LMFR/LWR равное примерно 1,1 при соотношении стоимостей топлива значительно ниже 1,0 для металлического топлива и около 1,0 для металлического топлива и около 1,0 для окисного топлива, даже с учетом существующих цен на уран. Американские прогнозы стоимости стандартизированных АЭС с LMFR (три энергоблока PRISM) указывают на то, что соотношение капитальных затрат и общих издержек производства равно приблизительно единице.

На современном уровне оценки затрат невозможно выявить какую-либо значительную разницу в стоимости LMFR и LWR применительно к американским условиям (см. рисунок). Однако любое увеличение стоимости урана даст преимущество LMFR. Таким образом, в американских и японских исследованиях делается вывод, что в будущем LMFR могут стать экономически конкурентоспособными по сравнению с легководными реакторами, если они



БЩУ быстрого реактора-размножителя Суперфеникс во Франции (Предоставлено: CEA)

будут выпускаться серийно в виде коммерческих стандартизированных энергоблоков.

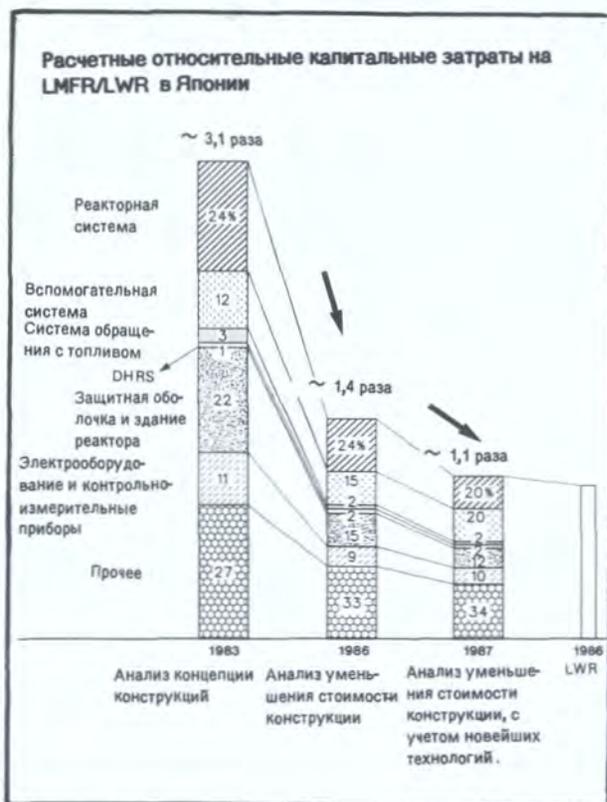
Важно отметить, что эти относительные экономические сравнения LMFR с легководными реакторами отражают опыт и ожидаемые условия в соответствующих странах и не принимают во внимание большие различия в абсолютных капитальных затратах на легководные реакторы, существующие между различными государствами. Добиться конкурентоспособности LMFR во Франции гораздо труднее, чем в других странах, из-за низких затрат на легководные реакторы в этой стране. Таким образом, более высокие (на 25 %) капитальные затраты на LMFR во Франции необязательно означают более высокие капитальные затраты на такой реактор в абсолютном выражении по сравнению с ожидаемыми затратами в США и Японии.

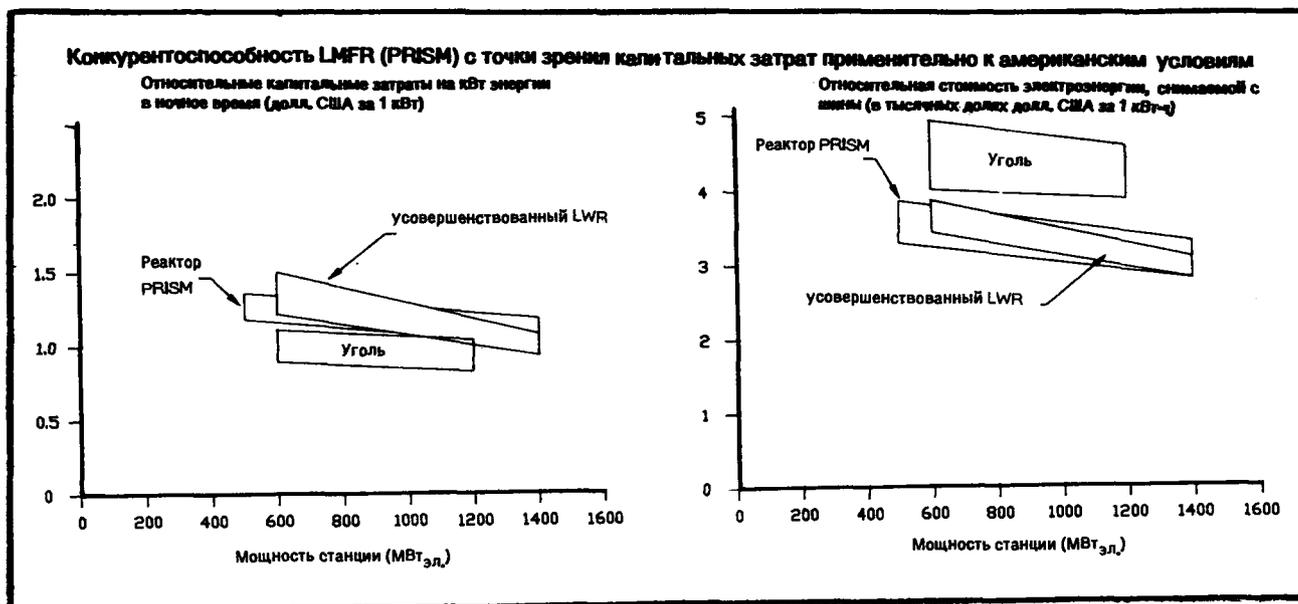
Коммерческое внедрение

В соответствии с существующей в настоящее время точкой зрения в Японии потребуется реализовать один или два дополнительных последовательных проекта демонстрационных реакторов, прежде чем она приступит к коммерческому внедрению многоблочных АЭС с LMFR, что произойдет, по всей видимости, не раньше 2030 г. В настоящее время в Европе считают, что АЭС с LMFR начнут заменять снятые с эксплуатации АЭС с легководными реакторами после 2010 г., причем в конкурентной борьбе с усовершенствованными легководными реакторами, которые появятся к этому времени. Это дает нам основание предположить, что экономичный демонстрационный реактор, например, EFR, будет построен примерно в течение следующего десятилетия. В США, как в Европе и Японии, процесс принятия решения о времени коммерческого внедрения LMFR включает в себя много переменных, например, спрос на электроэнергию, наличие ядерных ресурсов и ресурсов ископаемого топлива умеренной стоимости, альтернативы ядерной энергии, а также экологические ограничения, введенные в отношении сжигания ископаемого топлива. Следовательно, очень трудно, а может быть и невозможно, предсказать точное время,

когда LMFR станут абсолютно необходимы. Этот важный вопрос можно рассматривать с учетом нескольких различных перспектив.

Одна из перспектив учитывает крупные капиталовложения (свыше 30 млрд. долл. США по курсу 1988 г.), которые были сделаны в различных странах мира в развитие этой уникальной технологии, и потенциальное значение наличия этой технологии в качестве реальной энергетической альтернативы в конце этого столетия для подстраховки от любых возможных изменений в области производства электроэнергии в будущем. Для того, чтобы сделать эту технологию коммерчески доступной, потребуются





относительно небольшие дополнительные затраты, поэтому, учитывая этот факт, в данном варианте считается экономически целесообразным завершить разработку этой технологии.

Вторая перспектива связана с глобальной энергетической ситуацией, обусловленной ожидаемым ростом населения в развивающихся странах (к концу первой четверти следующего столетия ожидается его увеличение на 1,5 млрд. человек), надеждами населения всего земного шара на непрерывный экономический прогресс и усиливающимся беспокойством по поводу состояния окружающей среды (кислотные дожди и парниковый эффект). Для того, чтобы ускорить темпы экономического роста развивающихся государств, без чрезмерного ухудшения при этом глобального состояния окружающей среды, промышленно развитые страны должны будут снизить темпы потребления ископаемого топлива и дешевых урановых ресурсов, чтобы сохранить их для использования в доступных и простых в эксплуатации тепловых и атомных электростанциях в развивающихся странах. Это дает нам основание предположить, что промышленно развитые страны должны будут рассмотреть возможность более раннего широкомасштабного внедрения LMFR, даже с учетом несколько более высоких издержек на первом этапе, чтобы сэкономить дешевые урановые ресурсы для развивающихся стран.

Третья перспектива обусловлена симбиотической связью легководных реакторов и LMFR. В большинстве случаев плутоний, используемый в качестве первой топливной загрузки активных зон новых LMFR, будет извлекаться из отработавшего топлива легководных реакторов. За весь срок своей службы легководный реактор производит количество плутония, достаточное для загрузки

половины активной зоны LMFR. Следовательно с учетом ожидаемой к 2010 г. суммарной мощности легководных реакторов во всем мире наличного плутония будет достаточно для обеспечения топливом LMFR общей мощностью 200 ГВт_{эл.}. Нет более совершенного способа „хранения” и использования плутония, чем его применение в LMFR. Кроме того, использование плутония в цикле LMFR позволит „сжигать” соответствующие радиоактивные отходы, содержащие долгоживущие трансурановые элементы, в частности нептуний-237, а также другие менее важные актиниды, уменьшая, таким образом, время, необходимое для изоляции высокоактивных отходов, с десятков тысяч лет до нескольких сот лет только для продуктов деления. Эта дополнительная и очень важная миссия LMFR стала привлекать к себе интерес во всем мире в результате все возрастающего беспокойства по поводу безопасного захоронения высокоактивных отходов АЭС.

Все эти перспективы дают нам полное основание сделать вывод о необходимости поддержания усилий по разработке и демонстрации технических возможностей LMFR, по крайней мере, до тех пор, пока не будут получены лицензии и продемонстрированы коммерчески конкурентоспособные стандартные конструкции LMFR. Фактическое широкомасштабное внедрение таких отработанных конструкций на рынок следует отложить до начала следующего столетия. Технология LMFR является единственной отработанной технологией, способной производить расщепляющийся материал в практически неограниченных масштабах, используя богатые мировые ресурсы обедненного урана, природного урана низкого качества и тория для удовлетворения потребностей в ядерной энергии в следующем столетии и позднее.

