

# СТАТЬИ

УДК 621.039.526

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ-РАЗМНОЖИТЕЛЕЙ

*Митенков Ф.М. (ОКБМ им. И.И. Африкантова)*

На современном этапе становления ядерной энергетики не только определились базовые реакторы с водяным теплоносителем (ВВЭР, РБМК, PWR, BWR), но и получила практическое подтверждение идея расширенного воспроизводства в реакторах ядерного топлива, т.е. возможность организации такого нейтронно-физического процесса, при котором количество вновь образующихся делящихся изотопов существенно превышает количество разделившихся (коэффициент воспроизводства  $K_B > 1$ ). Такие реакторы позволят создать двухкомпонентную структуру ядерной энергетики (реакторы-размножители и тепловые реакторы), при которой тепловые реакторы работают на избыточном ядерном топливе, нарабатываемом в реакторах-размножителях. В некоторых странах в 50—60-х годах были созданы экспериментальные реакторы-размножители с натриевым теплоносителем, в которых реакция деления поддерживается преимущественно за счет быстрых нейтронов. Всесторонние исследования, проведенные на экспериментальных реакторах-размножителях, позволили создать опытно-промышленные АЭС с такими реакторами.

В СССР были сооружены две опытно-промышленные АЭС с быстрыми реакторами, реакторные установки которых различаются компоновочными решениями: петлевая БН-350 в Шевченко и моноблочная БН-600 в Заречном. АЭС с БН-350 отработала с превышением на 5 лет назначенный ресурс (с 1973 по 1998 гг.) и в настоящее время выведена из эксплуатации. АЭС с БН-600 успешно эксплуатируется с 1980 г.

Актуальность развития реакторов-размножителей. Возможность развития крупномасштабной ядерной энергетики определяется в первую очередь наличием доступных делящихся материалов. Естественные запасы урана исследованы и оценены [1]. С учетом их ограниченности, а также использования в тепловых реакторах не более 1% урана долговременное масштабное развитие ядерной энергетики невозможно. Этого заключения не меняет рециклирование топлива тепловых реакторов и вовлечение тория в топливный цикл. Реакторы-размножители по существу являются единственным средством полного использования урана и тория для производства энергии и тем самым обеспечивают длительное развитие ядерной энергетики. Поэтому перевод ядерной энергетики на замкнутый топливный цикл неизбежен, и реакторы-размножители со временем должны играть определяющую роль [1].

Следует заметить, что реакторы-размножители эффективно могут использоваться не только для расширенного воспроизводства ядерного топлива, но и для утилизации оружейного плутония, выжигания долгоживущих компонентов отходов отработавшего топлива перед захоронением.

В настоящее время только в России в плановой эксплуатации находится АЭС с БН-600, в стадии строительства — 4-й энергоблок Белоярской АЭС с БН-800, в котором использованы основные решения, оправдавшие себя в БН-600, и учтены новые требования безопасности, экономической оптимизации. Это позволило заметно улучшить технико-экономические показатели энергоблока, повысить электрическую мощность

на 200 МВт и уровень безопасности. США и Великобритания прекратили эксплуатацию прототипных реакторов-размножителей, во Франции заканчивается эксплуатация реактора «Феникс».

Сокращение объема и интенсивности работ по таким реакторам является отражением общего замедления работ, наблюдавшегося после аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской АЭС и, как следствие, избытка урана на международном рынке. Не последнюю роль здесь играет и недостаточная экономическая конкурентоспособность первых реакторов-размножителей.

В связи с этим необходимо отметить, что существенное превышение (~ 30%) капитальных затрат на сооружение энергоблоков с реакторами-размножителями по сравнению с ВВЭР объясняется в значительной степени тем, что при создании опытно-промышленных энергоблоков с реакторами-размножителями экономические показатели не относились к числу приоритетных. Определяющими характеристиками на этом этапе являлись безопасность, надежность, безотказность, коэффициент воспроизводства. Ко времени их создания энергоблоки с ВВЭР уже прошли достаточно большой путь экономической оптимизации в части и проектно-конструкторского совершенствования, и технологии изготовления, монтажа оборудования, и организации строительных работ.

Большие возможности технико-экономической оптимизации энергоблоков с реакторами-размножителями, несомненно, имеются и будут использоваться в перспективных проектах [2]. Для этого необходимо при проектировании учитывать, что принципиальная значимость основной функции реакторов — расширенное воспроизводство ядерного топлива не должна заслонять необходимость совершенствования и таких традиционных показателей, как:

- оптимизация способов и технических средств обеспечения безопасности;
- ресурсная надежность оборудования;
- простота проектных решений;
- простота управления реакторной установкой;
- ремонтпригодность оборудования и систем;
- конкурентоспособность по экономическим показателям: капитальные затраты, себестоимость производимой электроэнергии, срок окупаемости затрат и др.

Экономическое совершенствование реакторов-размножителей. Одним из определяющих показателей эффективности энергоблока АЭС является термодинамический к.п.д. цикла преобразования тепловой энергии в электрическую. В энергоблоках с такими реакторами термодинамический к.п.д. равен 40—43%, что значительно выше к.п.д. энергоблоков с ВВЭР — 32—35%. Это обусловлено существенно более высокой температурой теплоносителя (натрия) на выходе из быстрого реактора 550 °С по сравнению с ВВЭР (320—325 °С).

Дальнейшее повышение к.п.д. в случае быстрых реакторов может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

- увеличение температуры на выходе промежуточного теплообменника путем развития теплообменной поверхности;
- повышение теплостойкости конструкционных материалов активной зоны (оболочек твэлов и чехлов ТВС) в целях роста температуры натрия на выходе реактора;
- перевод парогенератора в сверхкритический режим работы по давлению и температуре пара.

Реализация указанных мероприятий может увеличить термодинамический к.п.д. дополнительно на 2—4%. В случае отказа от высоких значений КВ ликвидация боковой зоны воспроизводства также будет способствовать снижению затрат и, следовательно, повышению экономической эффективности быстрого реактора.

Существенное уменьшение капитальных затрат может быть получено за счет снижения металлоемкости. Конструктивные разработки, выполненные в процессе поиска оптимального варианта модернизации БН-600 (проект БН-600М), показали, что за

счет совершенствования конструкции промежуточного контура и оборудования систем обращения с ядерным топливом металлоемкость может быть уменьшена на 25%, в случае дополнительной замены модульных парогенераторов на корпусные — на 58%, что позволяет снизить и строительные объемы и в целом приблизиться к удельным затратам на ВВЭР и даже превзойти их.

Сравнительный технико-экономический анализ энергоблоков с БН-800 и ВВЭР-1000 (проект В-392) показал, что совершенствование промежуточного контура и транспортно-технологической системы БН-800 и последующая оптимизация строительных решений позволят даже при сохранении модульных парогенераторов свести различие в удельных затратах между энергоблоками до менее 11%. Наличие промежуточного контура в быстром реакторе следует рассматривать как обязательную составляющую часть, которая не только исключает химическое взаимодействие радиоактивного натрия первого контура с водой и паром при нарушении герметичности теплообменной поверхности в парогенераторах, но и является физическим барьером, предотвращающим воздействие высокого давления воды и пара (более 18 МПа) на корпус реактора и его внутренние компоненты, включая активную зону.

Перспективным направлением улучшения экономических показателей энергоблоков с быстрыми реакторами также является оптимизация топливного цикла, уменьшение вклада топливной составляющей в себестоимость производимой электроэнергии. Многолетний опыт эксплуатации БН-600 и исследования свидетельствуют о наличии больших возможностей на этом пути. Работы ведутся по двум направлениям: повышение глубины выгорания диоксидного топлива за счет оптимизации характеристик используемых материалов оболочки твэлов и чехлов ТВС, использование в активной зоне вместо диоксидного топлива нитридного, имеющего большую плотность и теплопроводность. За время эксплуатации БН-600 глубину выгорания топлива удалось повысить до 11% по тяжелым атомам, что намного больше проектных 7% тяж.ат. Имеются основания ожидать дальнейшего увеличения глубины выгорания. Французские исследователи на реакторе «Феникс» достигли выгорания 15% тяж.ат. [3]. Нитридное топливо было апробировано на экспериментальном реакторе БР-10, где было получено выгорание 8% тяж.ат.

В части дальнейшего повышения надежности и безопасности имеются перспективные направления. Одно из них — локализация всего объема натрия первого контура в корпусе, включая систему очистки. При таком решении исключаются патрубки на корпусе и трубопроводы первого контура за пределами реактора. Это существенно упрощает конструкцию первого контура, исключает течи радиоактивного натрия и соответственно его аварийное возгорание.

Указанные направления совершенствования и технико-экономическая оптимизация энергоблоков в целом далеко не исчерпывают всех возможностей, но и перечисленные направления свидетельствуют, что достижение конкурентоспособности с лучшими энергоблоками ВВЭР реально и при системном подходе к разработке перспективных проектов, несомненно, будет реализовано.

Теплоноситель в реакторах-размножителях. Как известно, в результате всесторонних исследований разных теплоносителей разработчики проектов реакторов-размножителей во всех странах остановили свой выбор на натрии. Этому решению способствовали исключительно хорошие теплофизические свойства натрия, совместимость со многими конструкционными материалами, относительная простота поддержания качества при эксплуатации, а также низкие стоимостные показатели:

	Натрий	Свинец
Плотность при 450 °С, кг/м <sup>3</sup> . . .	845	10 470
Температура, °С		
плавления. . .	97,8	327,4
кипения. . .	883	1737

Теплопроводность при 450 °С, Вт/(м·К). . .	68,9	15,7
Теплоемкость при 450 °С, кДж/(кг·К). . .	1,272	0,155
Распространение в земной коре, %. . .	2,85	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Стоимость натрия реакторной очистки, дол./кг. . .	3—5	—
Стоимость свинца, дол./кг:		
неочищенного (по ценам 2001 г.). . .	—	1
очищенного марки СОО (по преискуртанту № 02-01 от 01.01.1986 г.). . .		1,25
очищенного марки СОООО (по преискуртанту № 02-01 от 01.01.1986 г.). . .		200

Однако натрий пожароопасен при контакте с водой и воздухом. Поэтому потребовалось разработать специальные технические решения, исключающие недопустимые проявления пожароопасности. Эффективность этих решений подтверждена многолетней промышленной эксплуатацией АЭС с БН-350, - 600. Конечно, решения наложили свой отпечаток на конструкцию оборудования, контактирующего с натрием, на схемные решения реакторной установки в целом.

В последние годы широко обсуждается предложение о замене натрия другим теплоносителем [1, 4—6] и уже развернуты проектные работы по использованию свинца в реакторах-размножителях. При обосновании целесообразности замены декларируется, что натрий исчерпал себя как теплоноситель и не создает условий для технического совершенствования реакторов-размножителей, повышения их безопасности, улучшения экономических показателей. Все эти негативные утверждения однозначно связываются с пожароопасностью натрия и низкой температурой кипения. Однако каких-либо результатов конкретных исследований в подтверждение указанных утверждений не приводится. Ранее были обозначены реальные направления технического совершенствования и оптимизации характеристик установок с быстрыми реакторами, по которым уже ведутся плановые работы в течение нескольких лет. Большинство этих работ носит общий характер и отнюдь не ограничивается только особенностями теплоносителя. Поэтому сделать обоснованное заключение о предпочтительности того или иного теплоносителя в реакторе-размножителе, сравнивая только их отдельные физические свойства, нельзя. Реакторные установки — это сложные технические комплексы, и оптимальность их технико-экономических и эксплуатационных характеристик не может обеспечиваться за счет какой-либо отдельной составной части, например, теплоносителя. Она практически достигается за счет системной оптимизации, которая всегда предполагает выбор решений на основе компромисса. При этом отдельные составные части могут иметь неоптимальные значения или свойства. Поэтому обоснование целесообразности замены натрия на другой теплоноситель, например, свинец требует системного анализа в рамках реакторной установки, где пожароопасность натрия и инертность свинца будут только одними из многих факторов, подлежащих учету при выборе решения.

Корректный сравнительный анализ затрудняется тем, что по натрию в нашей стране и других странах уже накоплен большой опыт в процессе создания и эксплуатации экспериментальных, демонстрационных и опытно-промышленных реакторных установок и энергоблоков. Затраты в СССР на их создание, исследования, эксплуатацию оцениваются ~ 12 млрд дол., в мире в целом — 50 млрд дол. [7]. Ни одного реактора в мире со свинцовым теплоносителем не создавалось и никакого опыта по его использованию как теплоносителя нет. Ссылки на опыт использования эвтектического сплава свинец—висмут в корабельных реакторных установках неправомерны, поскольку по физическим характеристикам он значительно отличается от свинца и, в первую очередь, по температуре плавления (температура плавления свинцово-висмутового сплава 127 °С, свинца — 327,4 °С). Температура плавления теплоносителя в значительной степени определяет проектные, конструктивные решения и реактора, и установки в целом, эксплуатационные условия, ремонтпригодность.

Для свинца потребуется заново разработать систему поддержания качества при эксплуатации реакторной установки, поскольку рабочая температура, соотношение объема свинца и омываемых им поверхностей резко отличаются от соответствующих значений корабельной установки со сплавом свинец—висмут.

Поэтому, обсуждая замену теплоносителя, следует понимать, что речь идет о совершенно новом реакторном направлении в ядерной энергетике, по которому ни в нашей стране, ни в мире в целом опыта нет. Учет этого обстоятельства приводит к заключению, что создание реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем потребует проведения не меньшего объема исследовательских, экспериментальных, опытных работ и существенно больших финансовых затрат [8].

Конечно, отказ от многолетнего дорогостоящего опыта использования натриевого теплоносителя не может основываться только на декларативных суждениях сторонников свинцового теплоносителя. Для этого необходимы объективные выверенные результаты сравнительного анализа. Масштабность этой проблемы и последствия решений таковы, что безусловно требуется представительное обоснование целесообразности развертывания работ со свинцовым теплоносителем.

Опыт создания реакторных установок нового типа и различного назначения позволяет выделить несколько последовательных этапов, которых, безусловно, следует придерживаться. Применительно к рассматриваемой проблеме их можно сформулировать следующим образом:

принципиальное обоснование целесообразности создания реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем. Его основу должен составлять перечень новых потребительских качеств, которые в принципе не могут быть обеспечены реакторами с натриевым теплоносителем;

обоснование технической реализуемости предложения в рамках действующих обязательных нормативов с гарантированным обеспечением заявленных потребительских качеств, обоснование как минимум в объеме развернутого технического предложения или эскизного проекта с отражением специфических особенностей, связанных со свинцовым теплоносителем;

обоснование необходимых научно-исследовательских, экспериментальных, опытно-конструкторских работ, сроков их завершения, оценка необходимых для выполнения финансовых средств;

обоснование этапов создания реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем с учетом традиционного подхода — экспериментальный реактор, демонстрационный реактор, коммерческий (промышленный) реактор.

К сожалению, сторонники предложения об использовании свинцового теплоносителя по существу не информируют о каких-либо новых потребительских качествах, которые могут быть получены только в реакторах с этим теплоносителем, ограничиваясь утверждением, что в таком реакторе обеспечивается естественная безопасность. Сравнительные относительные характеристики активных зон следующие:

	БН-800 (натрий)	БРЕСТ-300 (свинец)
Удельная загрузка (кг/кВт) делящегося материала . . .	1	1,9
Теплонапряженность . . .	1	0,4
Коэффициент теплоотдачи в ТВС . . .	1	0,17
Объемная доля топлива . . .	1	0,6
Макросечения замедления нейтронов по теплоносителю . . .	1	0,27
Макросечения поглощения нейтронов по теплоносителю . . .	1	2,29

Из рассмотрения характеристик можно сделать заключение, что по теплофизическим и нейтронно-физическим параметрам, а также экономическим показателям реактор со свинцовым теплоносителем всегда будет существенно уступать реактору с натриевым теплоносителем при реализуемых конструктивных решениях и материалах

активной зоны. Так, нетрудно убедиться, что при одной и той же максимальной температуре оболочки твэла температура свинца на выходе из реактора должна быть на 40—50 °С ниже, чем натрия, а это непосредственно скажется на температуре пара, термодинамическом к.п.д.

В исследованиях [5] проведено детальное сравнение натрия и свинца как возможных теплоносителей, отмечены достоинства и недостатки каждого из них и по результатам сделано заключение о неоспоримом преимуществе реактора с натриевым теплоносителем по таким параметрам, как гидравлические потери, мощность на прокачку, естественная циркуляция. По теплоаккумулирующей способности он уступает реактору со свинцовым теплоносителем примерно на 20%. При одной и той же тепловой мощности размеры реактора со свинцовым теплоносителем будут существенно превышать размеры реактора с натриевым теплоносителем. При сравнимых условиях оборудования для реактора со свинцовым теплоносителем будет существенно более металлоемким.

Безопасность реакторов-размножителей. При использовании свинцового теплоносителя большие надежды связываются с реализацией естественной безопасности. По мнению авторов [6], естественная безопасность является тем принципом, который позволит снизить вдвое стоимость оборудования систем и сооружений АЭС, поскольку их стоимость якобы определяется требованиями безопасности. Высокий уровень безопасности за счет отказа от потенциально опасных решений и использования природных закономерностей, по их мнению, создает предпосылки для упрощения конструкций, снижения требований к основному и вспомогательному оборудованию, сооружениям АЭС, а также персоналу, к отказу от дополнительных систем безопасности. В этом утверждении обращает на себя внимание указание на значимость отказа от потенциально опасных решений и учета природных закономерностей. Но эти два положения являются само собой разумеющимися для конструкторов любых технических систем, поскольку попытки создавать какую-либо систему вопреки природным законам, используя потенциально опасные решения, не более чем нонсенс.

Учитывая неопределенность содержания введенного понятия «естественная безопасность», с одной стороны, и принципиальную значимость ее реализации в проекте согласно утверждению авторов, с другой, имеет смысл попытаться раскрыть конкретное содержание понятия с помощью доступных проектных материалов о свинцовом теплоносителе (сообщения, публикации, проектные разработки) [6, 9—11]. Такой подход приводит к заключению, что естественная безопасность предполагает:

- детерминистское исключение тяжелых аварий;
- выбор наиболее тяжелой (максимальной) проектной аварии, перекрывающей по масштабам возможных последствий любые другие, включая ошибки персонала;
- воспроизводство ядерного топлива в активной зоне КВА ~ 1;
- запас реактивности всегда меньше  $\beta$ ;
- отрицательный пустотный эффект реактивности;
- необходимые запасы температуры теплоносителя, топливной композиции до фазовых переходов;
- надежность теплоотвода от активной зоны в любых ситуациях;
- наличие стабилизирующих обратных связей по температуре, расходу теплоносителя;
- баланс радиоактивности между извлекаемым из земли ураном и захораниваемыми радиоактивными отходами.

Из рассмотрения приведенного перечня положений, в совокупности и составляющих, по-видимому, содержание понятия «естественная безопасность», можно видеть, что за исключением последнего положения, непосредственно не относящегося к реакторной установке, в нем не содержится чего-то существенно нового, качественно отличающегося от тех положений, которыми традиционно руководствуются при проектировании реактора, реакторной установки и АЭС с быстрым реактором с натриевым

теплоносителем. Однако необходимо внести уточнения. Акцент на детерминистское исключение тяжелых аварий и отрицание необходимости вероятностного анализа наряду с детерминистским неправомерен. Детерминистский подход предполагает точное (однозначное) знание всех параметров, описывающих конструкцию, процессы и др. Практически так не бывает и не только в инженерной практике, в связи с чем детерминистское описание всегда условно. Эта условность и диктует необходимость варьирования параметров и вероятностного анализа при теоретических исследованиях, что особенно важно при оценке безотказности оборудования и риска. Относительно выбора максимальной проектной аварии следует напомнить, что по рекомендации МАГАТЭ в национальные нормативы по безопасности внесено положение о постулированной аварии, которое предписывает, что в тех случаях, когда невозможно достоверно обосновать нереализуемость в данной конструкции реактора физически возможных аварий, приводящих к тяжелым последствиям для окружающей среды, следует постулировать расплавление активной зоны и доказать, что принятые проектные решения исключают недопустимые воздействия на окружающую среду и население. Представляется, что такой подход однозначно решает вопрос о максимальной аварии.

Обеспечение  $K_{\text{ВА}} = 1$  и условия запаса реактивности меньше  $\beta$  в течение всего периода работы, отрицательного пустотного эффекта реактивности в реакторах с натриевым или свинцовым теплоносителем безусловно желательно, но оно связано с решением следующих однотипных задач:

определение технически реализуемых в реакторе условий, включая требования к коэффициенту воспроизводства активной зоны, точности обеспечения загрузки, стабильности изотопного состава топлива, обратным связям, режимам работы и скорости их изменений и др., при которых допустимо ограничение запаса реактивности менее  $\beta$ ;

создание активной зоны с более плотным топливом, чем диоксид, и достаточно глубоким выгоранием.

В обоих случаях решение задачи связывается с нитридным топливом. Затраты на отработку нитридной зоны с натриевым теплоносителем будут, конечно, существенно меньше, поскольку материалы активной зоны, режимы работы и др. уже известны и отработаны. Запас по температуре фазового перехода требует конкретного рассмотрения с учетом конструкционных материалов, используемых в активной зоне и реакторе в целом, поскольку есть основания полагать, что существует оптимальный запас относительно температуры фазового перехода теплоносителя. Например, в случае тяжелых аварий, приводящих к перегреву активной зоны, температурное состояние твэлов будет существенно различно для натриевого и свинцового теплоносителя. Действительно, при температуре плавления оболочки твэла (сталь)  $\sim 1450^\circ\text{C}$  в кипящем натрии оболочка не плавится, интенсифицируется теплоотдача. При свинцовом теплоносителе оболочка расплавляется еще до того, как свинец закипит ( $T_s = 1720^\circ\text{C}$ ), расплавляются также и металлоконструкции.

Перечень систем безопасности для быстрого реактора со свинцовым теплоносителем, которые разработчик предусматривает, руководствуясь принципом «естественной безопасности», аналогичен перечню для быстрого реактора с натриевым теплоносителем, который проектировался по традиционной схеме: защитные системы — системы аварийного расхолаживания, аварийной защиты реактора, защиты от превышения давления газа реактора, аварийного сброса пара при течах парогенератора, защиты от превышения давления газа во втором контуре, обнаружения течи парогенераторов, локализирующие системы — страховочный корпус реактора, страховочные кожухи на вспомогательных трубопроводах первого контура, система предотвращения выхода радиоактивного газа и аэрозолей в обслуживаемые помещения и окружающую среду, обеспечивающие системы — системы надежного производственного водоснабжения, надежного электроснабжения систем безопасности, пожаротушения кабельных помещений систем безопасности, вентиляции и кондиционирования воздуха помещений

систем безопасности, управляющие системы безопасности (по номенклатуре защитных, локализирующих и обеспечивающих систем безопасности). Составы систем безопасности полностью совпадают, за исключением системы пожаротушения, которая предусматривается для реактора с натриевым теплоносителем. Это и позволяет утверждать, что введенное понятие «естественная безопасность» нового содержания не несет.

В обоих случаях безопасность достигается за счет целенаправленного выбора схемных, конструктивных решений, реализации необходимых обратных связей (по знаку и значению), самосрабатывающих защитных устройств и при необходимости физических барьеров на пути возможного распространения радиоактивных продуктов при тяжелых авариях.

**Конструктивные решения.** Опыт создания реакторной установки с разными теплоносителями однозначно свидетельствует об определяющей роли теплоносителя при выборе конструктивных решений, материалов конструкции и обосновании эксплуатационных режимов. Поэтому во всех известных случаях созданию демонстрационных и коммерческих реакторов с новым теплоносителем предшествовала разработка экспериментальных реакторов и их всестороннее исследование.

В нашей стране сооружению первой АЭС с быстрым реактором предшествовало создание экспериментальных реакторов БР-5, БОР-60. Такая последовательность позволила получить необходимую информацию о технологии обращения с натрием, выработать требования по предотвращению недопустимых проявлений его химической активности, проверить обоснованность выбранных конструкционных материалов, ядерного топлива и др. [2]. Именно на результаты исследований экспериментальных реакторов опирались при проектировании АЭС с БН-350, затем с БН-600 и БН-800. С учетом сказанного нельзя признать обоснованным предложение начать освоение свинцового теплоносителя с сооружения АЭС с реактором электрической мощностью 300 МВт, минуя стадию экспериментальных реакторов малой мощности [6]. Апробирование наиболее ответственных конструктивных решений, как-то конструктивных схем приводов поглощающихборок, фиксации ТВС и др., выбор и аттестация конструкционных материалов, контактирующих со свинцом, обоснование требований к ним должны проводиться «с нуля». То же относится и к обоснованию требований, условий и средств поддержания характеристик свинца при эксплуатации, от которых также зависит выбор конструкционных материалов. Переносить решение перечисленных принципиальных вопросов со стадии экспериментального реактора на стадию демонстрационной АЭС недопустимо.

Вызывает возражение и отказ от трехконтурной схемы реакторной установки, принятой для всех установок с быстрыми реакторами. Хотя в случае свинцового теплоносителя опасность недопустимых радиационных последствий при контакте свинца первого контура с водой отсутствует, но остается опасность переопрессовки первого контура и масштабного разрушения активной зоны при возможном воздействии импульса давления в случае аварийной разгерметизации теплообменной поверхности парогенератора. Скорее всего, отказ от промежуточного контура является потенциально опасным решением.

Несординарной задачей для активной зоны со свинцовым теплоносителем является разработка механической фиксации ТВС, исключающей ее всплытие при работе реактора и в то же время гарантирующей возможность выгрузки ТВС после длительного (7—14 лет) пребывания в свинце при температуре более 400 °С, теплосменах, интенсивном нейтронном облучении. Особенно сложной для практического решения задачей может оказаться экспериментальное подтверждение надежности той или иной схемы фиксации.



Если при проектных решениях нельзя будет доказать принципиальную (физическую) невозможность расплавления активной зоны, то максимальная авария будет совпадать с постулированным расплавлением активной зоны. Анализ такой аварии сведется к решению двух задач:

недопущение образования расплавом вторичной критической массы;  
обеспечение теплоотвода от расплава при сохранении целостности корпуса реактора.

В реакторе с натриевым теплоносителем положительное решение первой задачи достигается за счет организации скопления расплава в днище корпуса при гарантированном исключении критичности. При этом принимаются конструктивные меры для обеспечения теплоотвода от расплава, исключающие перегрев корпуса реактора. В случае реактора со свинцовым теплоносителем плотность расплава активной зоны будет меньше плотности свинца, поэтому определенного представления о месте скопления расплава не будет и велика вероятность его скопления за пределами корпуса реактора и в разных местах. Такая неопределенность потребует поиска специальных решений для предупреждения образования вторичной критической массы и организации теплоотвода в местах возможного скопления расплава.

Опасность образования вторичной критической массы усугубляется существенно большей загрузкой ядерного топлива в реакторе со свинцовым теплоносителем и неизбежным процессом сепарации расплава от легких компонентов конструкционных материалов за счет всплытия. Указанные особенности поведения расплава в свинцовом реакторе могут серьезно осложнить конструкцию реакторной установки независимо от типа компоновочных решений (блочная, моноблочная).

**Конструкционные материалы.** Для быстрых реакторов выбор конструкционных материалов не представил особых трудностей, поскольку ориентация на нержавеющую сталь оправдалась представительными проверками на экспериментальных реакторах. Специальный поиск конструкционных материалов потребовался для кожухов ТВС и оболочки твэла. По мере увеличения глубины выгорания ядерного топлива требования к материалам этих элементов по тепловой и радиационной стойкости возрастают. Поэтому поиск более теплорадиационно-стойких материалов ТВС будет продолжаться и впредь.

Для быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем выбор конструкционных материалов, включая представительные испытания, аттестацию, будет неслегкой задачей. На это указывает опыт выбора материалов для контура с эвтектическим сплавом свинец—висмут. Присущие свинцу эрозионная и коррозионная активность, стимулирование переноса железа через защитную оксидную пленку и др., сильная зависимость этих особенностей от температуры усложняют выбор и соответствующее обоснование. Конструкционные материалы для ТВС со свинцовым охлаждением являются самостоятельной проблемой, поскольку для их выбора и обоснования нужны представительные экспериментальные исследования с имитацией рабочих условий по температуре, флюенсу нейтронов, гидродинамическим воздействиям.

**Финансовые затраты.** Как и в случае освоения натриевого теплоносителя, большая часть затрат при освоении свинцового теплоносителя, безусловно, будет связана с экспериментальными исследованиями материалов, испытаниями конструктивных узлов, опытных образцов оборудования и систем, технологией поддержания качества свинцового теплоносителя. Вследствие более высокого исходного уровня температуры в случае свинца (более 370 °С) проведение экспериментов заведомо будет более сложным, следовательно, и более дорогим по сравнению с натрием и эвтектическим сплавом свинец—висмут. Как уже отмечалось, в нашей стране затраты на создание и освоение реакторов-размножителей с натриевым теплоносителем оцениваются примерно в 12 млрд дол. Нет оснований думать, что освоение свинцового направления потребует меньших затрат. Напротив, изложенные соображения свидетельствуют о том, что эти затраты существенно возрастут.

Таким образом, развитие и совершенствование реакторов-размножителей является актуальной задачей, поскольку крупномасштабная ядерная энергетика невозможна без их включения в ее структуру. Перспективное развитие должно проводиться на базе натриевого теплоносителя. Совокупность его свойств, определяющих теплотехнические и конструктивные характеристики реакторной установки, не достигается другими известными теплоносителями, в том числе и свинцом. Единственный недостаток натрия — пожароопасность успешно преодолевается техническими мероприятиями, что подтверждается многолетней эксплуатацией. Переход на свинцовый теплоноситель не обеспечит каких-либо новых потребительских качеств, реализация которых была бы невозможна с натриевым теплоносителем. Одной из приоритетных задач является повышение технико-экономических характеристик установок с быстрыми реакторами с натриевым теплоносителем, обеспечение конкурентоспособности с реакторными установками ВВЭР. Проведенные к настоящему времени разработки показывают реальные направления решения этой задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. — Бюл. Центра общественной информации по атомной энергии, 2000, № 6, с. 4—17.
2. Поплавский В.М. Атомная электростанция с реактором на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением на современном этапе и возможные пути ее совершенствования. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях, т. 2, ФЭИ, Обнинск, 1999, с. 470—481.
3. Status of Liquid Metal Cooled Fast Reactor Technology. IAEA-TECDOC-1083, 1999.
4. Ламба В. Преимущества и недостатки быстрых реакторов с различными теплоносителями (аналитический обзор). — Бюл. по атомной энергии, 2001, № 9, с. 32—37.
5. Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А., Камаев А.А. Сравнение натрия и тяжелого теплоносителя как охлаждающей среды для быстрого реактора. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях, т. 2, ФЭИ, Обнинск, 1999, с. 482—495.
6. Адамов Е.О., Орлов В.В. Развитие атомной энергетики на базе новых концепций ядерных реакторов и топливного цикла. — Там же, т. 1, с. 25—32.
7. Зродников А., Кузин В., Тушинский Г. и др. ТЖМР-10. Научно-технический и экономический эффект. — Журн. Ядерного общества, 2001, № 3—4, с. 30—33.
8. Mourougov V., Juhn P.E., Kupitz J., Rineiskii A. Liquid-metal-cooled-fast reactor (LMFR) development and IAEA activities. — Energy, 1998, т. 23, № 7—8, с. 637—648.
9. Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. и др. Проект ЛЭС с реакторами естественной безопасности (БРЕСТ) со свинцовым теплоносителем. — Докл. на Межд. сем. «Стратегия разработки ядерных топливных циклов быстрых реакторов», Япония, 3—9 февр., 2001 г.
10. Белая книга ядерной энергетики. Под общей ред. Е.О. Адамова. М., ГУП НИКИЭТ, 2001.
11. Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение. Труды Межд. сем. М., Мин-во РФ по атомной энергии, 2000.

Поступила в Редакцию 26.12.01

УДК 621.039.542.34:621.039.526+621.039.546

ИССЛЕДОВАНИЕ  $\text{ThO}_2$  И  $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2$ 

Курина И.С., Гудков Л.С., Румянцев В.Н. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

В ГНЦ РФ — ФЭИ ведутся работы по изучению перспектив развития ядерной энергетике и путей вовлечения в нее тория как дополнительного ресурса. Одновременно изучаются те полезные качества, которые может принести с собой использование тория в реакторах существующего типа. Большое значение придается оптимизации технологии изготовления топлива, особенно получению порошков, свойства которых оказывают определяющее влияние на качество спеченных таблеток [1—3]. Результаты технологических проработок получения и исследования торийсодержащих композиций  $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2$ ,  $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2 + \text{MgO}$ ,  $(\text{U}, \text{Th}, \text{Ca})\text{O}_2$  уже были представлены в работах [4—6].