



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

П. Н. Алексеев, Ю. А. Зверков,
А. Г. Морозов, В. В. Орлов,
Н. Н. Пономарев-Степной, А. А. Прошкин,
И. С. Слесарев, С. А. Субботин

ИАЭ-4804/4

**ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МОДУЛЬНЫЙ РЕАКТОР
С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Москва — ЦНИИАтоминформ — 1989

Ключевые слова: модульный жидкометаллический быстрый реактор, эффекты реактивности, самозащищенность, уровень естественной циркуляции теплоносителя, устойчивость к тяжелым авариям.

Рассматривается концепция реакторной установки с модульным быстрым реактором, охлаждаемым жидкометаллическим теплоносителем. Предлагаемая реально возможная на современном уровне развития реакторной техники и технологии концепция характеризуется высоким уровнем безопасности за счет самозащищенности и повышенной наработкой ядерного горючего на основе внутрикассетной гетерогенной компоновки активной зоны.

The concept of a reactor plant with a modular liquid-metal cooled fast reactor is considered. The proposed concept realizable at the present-day level of reactor technology development is characterized by a high degree of safety resulting from self-protection and increased fuel buildup based on the intra-assembly heterogeneous arrangement of the reactor core.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования и анализ развития энергетики как у нас в стране, так и за рубежом свидетельствуют о том, что на ближайшие десятилетия нет альтернативы значительному увеличению производства энергии ядерными энергетическими установками. Необходимость широкого развития атомной энергетики (АЭ) требует качественного улучшения безопасности атомных станций (АС), повышения их экономической эффективности, улучшения топливоиспользования и в перспективе решения задачи бридинга ядерного горючего.

Опыт эксплуатации АС привел к необходимости рассмотрения причин и последствий "маловероятных" аварийных ситуаций (ранее считавшихся гипотетическими), разработки мер по предотвращению таких аварий и минимизации ущербов от них. В первую очередь это касается неконтролируемых аварий, вызываемых нарушением режимов эксплуатации с одновременным частичным или полным отказом "активных" средств аварийной защиты. Уровень безопасности АС, устойчивости к тяжелым авариям является принципиальным и одним из основных современных требований и определяет пригодность АС для массового использования и возможную сферу ее применения: электроэнергетика, снабжение теплом разного потенциала и т.д. Основной задачей современного этапа развития АЭ считается разработка и создание АС с принципиально более высоким уровнем безопасности по сравнению с существующими проектами АС при условии обеспечения их эффективности [1].

Повышение уровня безопасности АС может идти по следующим направлениям, условно названным экстенсивным и интенсивным:

— Экстенсивное направление в соответствии с традициями современных АС заключается в совершенствовании инженерных активных защитных средств, повышении надежности оборудования, широком использовании превентивных диагностических систем и защитных оболочек реактора, улучшении работы эксплуатационных служб и т.п.;

— Интенсивное направление заключается в качественном изменении подхода при создании реакторов в сторону повышения самозащищенности реактора за счет внутренне присущих ему свойств и пассивных инженерных средств, т.е. за счет оптимизации конструкции активной зоны с учетом получения необходимых эффектов реактивности, использования теплогидравлических закономерностей, гравитация, запасенной энергии для остановки реактора и гарантированного отвода зазасен-

ного тепла и остаточного энергоснабжения в течение необходимого времени без вмешательства персонала АС.

Эти два направления не являются взаимоисключающими и служат дополнением друг другу. Однако наибольший прогресс в разработке высокобезопасной и экономичной АС ожидается на втором направлении [2 – 5].

Следует отметить, что не для всех типов реакторов достижима полная самозащищенность, т.е. не для всех типов реакторов можно ограничить область всех возможных его состояний областью допустимых состояний без вмешательства активных систем управления и защиты. Это обстоятельство принципиально важно при выборе направлений разработки перспективных реакторов.

В настоящее время в СССР и за рубежом ведутся интенсивные разработки высокобезопасных реакторов нового поколения. Предварительные исследования показали, что большим потенциалом повышения безопасности на пути обеспечения полной самозащищенности обладают быстрые реакторы. Ниже излагается одна из реально возможных на современном уровне развития реакторной техники и технологии концепция АС с быстрым реактором, охлаждаемым жидкометаллическим теплоносителем — модульный жидкометаллический быстрый безопасный реактор (МЖБР).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поиск компоновки активной зоны реактора, отвечающего требованию полной самозащищенности, — трудная оптимизационная задача, в которой ограничения будут наложены на функционалы не только в номинальных режимах работы, но и во всех возможных асимптотических состояниях и во всех возможных переходных процессах. Для решения подобной задачи в области реакторной физики еще не имеется математических средств. Поэтому выбор компоновки активной зоны реактора с высоким уровнем безопасности проводился при выполнении требования не превышения допустимых температур топлива, конструкционных материалов и теплоносителя в случаях отказа срабатывания аварийной защиты в следующих аварийных ситуациях:

- потеря принудительной циркуляции теплоносителя;
- нарушение теплоотвода от первого контура через теплообменник с принудительной циркуляцией теплоотводящей среды;
- потеря давления в контуре, связанная с нарушением герметичности контура;
- несанкционированный ввод положительной реактивности;
- локальное перекрытие проходного сечения теплоносителя в отдельной ТВС;
- потеря всех источников электропитания.

К тому же АС с таким реактором должна быть конкурентоспособна с другими АС как по экономическим, так и по бридинговым показателям.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Для решения поставленной задачи были предложены следующие основные технические решения:

— использование хорошо исследованного жидкометаллического натриевого теплоносителя, позволяющего осуществлять надежный теплоотвод при атмосферном давлении;

— применение нетрадиционно "широкой" решетки твэлов и бесчехловых тепловыделяющих сборок (ТВС), позволяющих снизить пустотный и плотностной эффекты реактивности до требуемых величин, избежать нарушения теплоотвода из-за локального перекрытия проходного сечения теплоносителя в ТВС, снизить более чем на порядок величину гидравлического сопротивления ТВС;

— компоновка активной зоны с внутрикассетной окисно-металлической (окисно-карбидной) гетерогенностью (ВКГ) с соотношением окисных ($UO_2 - PuO_2$) и сырьевых металлических (карбидных) твэлов в треугольной решетке, равным 2 : 1, позволяющая получить предельно слабое изменение реактивности с выгоранием топлива за счет обеспечения требуемой величины коэффициента воспроизводства активной зоны (КВА) и снизить запас реактивности на компенсацию мощностных и температурных эффектов за счет ужесточения спектра нейтронов и снижения средней температуры топлива [2];

— модульная компоновка АС при относительно небольшой единичной мощности реактора 500 — 1500 МВт (тепл.), позволяющая отводить остаточное энерговыделение за счет естественной конвекции воздуха или воды снаружи корпуса реактора и через встроенные в первый контур аварийные теплообменники;

— обеспечение высокого уровня естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя в первом контуре (в варианте с принудительной циркуляцией (ПЦ) теплоносителя 30 — 40% мощности отводится за счет ЕЦ при номинальном подогреве теплоносителя, что обеспечивает допустимые режимы протекания аварийных переходных процессов; в варианте со 100%-ным отводом мощности за счет ЕЦ можно еще более повысить надежность и безопасность работы реактора и упростить его конструкцию).

Далее, при должном уровне технологических и конструкторских проработок, наряду с натриевым могут быть использованы и пожаробезопасные тяжелые жидкометаллические теплоносители, например, Pb, Pb-Bi, Pb-Mg, имеющие большой запас теплоемкости и температуры

до кипения. Это позволит освободиться от такого негативного свойства натриевого теплоносителя, как пожароопасность; радикально уменьшить количество запасенной энергии, обусловленной возможным химическим взаимодействием натрия с воздухом и водой; еще более снизить температурные, мощностные, плотностные и пустотный эффекты реактивности; увеличить коэффициент воспроизводства (КВ) горючего [3].

Дополнительно к уже перечисленным в МЖБР будут использованы такие решения:

- применение кластерной системы СУЗ для уменьшения "веса" отдельных стержней;

- отказ от внутриреакторных хранилищ для уменьшения количества топлива и продуктов деления внутри реактора;

- выбор конструкции подвески активной зоны и приводов СУЗ, обеспечивающей движение зоны и регулирующих стержней навстречу друг другу при аварийном разогреве теплоносителя.

ВЫБОР ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Обеспечение высокой безопасности АС с МЖБР за счет самозащитенности связано с ограничением номинальной мощности реактора. Выбор допустимой мощности определяется путем выполнения следующих требований:

- величина плотностного коэффициента реактивности и пустотного эффекта реактивности по теплоносителю не должна превышать допустимых значений;

- должна быть обеспечена возможность пассивного отвода остаточного энерговыделения через корпус реактора и (или) через встроенные в первый контур аварийные теплообменники естественной конвекцией воздуха или воды;

- АС с МЖБР должна быть конкурентоспособна с другими АС по экономическим и бридлинговым показателям.

Величина плотностного эффекта реактивности должна быть такова, чтобы результирующие мощностные и температурные эффекты реактивности были достаточны для поддержания температуры топлива, конструкционных материалов и теплоносителя в допустимых пределах во всех рассматриваемых аварийных процессах и асимптотических состояниях даже без срабатывания аварийной защиты. Плотностной коэффициент реактивности работает совместно с большим по величине доплеровским коэффициентом реактивности, слабо зависящим от размеров реактора, и коэффициентом реактивности за счет расширения активной зоны, зависящим от размеров реактора. Таким образом, допустимая величина плотностного эффекта реактивности определяется всей компоновкой реактора (размерами активной зоны, составом активной зоны

и экранов, материалом опорных конструкций) и допустимое по плотностному эффекту значение мощности будет сильно вырваться при изменении компоновки активной зоны и реактора в целом.

В реакторах с принудительной циркуляцией теплоносителя имеется возможность попадания водородсодержащей среды (машинного масла) или газового пузыря в активную зону. В традиционных быстрых реакторах с натриевым теплоносителем это может привести к вводу реактивности, которую не удастся скомпенсировать за счет изменения внутренних свойств реактора в допустимых пределах без срабатывания систем аварийной защиты. Поэтому требование обеспечения самозащищенности в случае ПЦ приводит к выбору компоновки реактора, при которой положительные пустотные эффекты могут быть скомпенсированы только за счет изменения внутренних свойств реактора без превышения допустимых пределов.

В случае ЕЦ в реакторе, обладающем свойствами замозащищенности, введение положительной реактивности за счет удаления теплоносителя из реактора возможно только при полном разрушении и основного, и страховочного корпуса реактора. Вероятность такого события должна быть очень мала и практически не зависит от величины пустотного эффекта реактивности, поскольку самозащищенный реактор не может содержать в себе источника разрушения корпуса. К тому же в случае разрушения корпуса с потерей теплоносителя вопрос стоит только о размере аварии, что в малой степени зависит от величины пустотного эффекта реактивности. Таким образом, в самозащищенном реакторе с ЕЦ практически нет ограничения по мощности и размеру реактора со стороны пустотного эффекта реактивности, тем более, что существуют возможности достижения неположительного пустотного эффекта реактивности.

Самым существенным ограничением по мощности является требование пассивного отвода остаточного энерговыделения через корпус реактора путем естественной конвекции воздуха. При диаметре корпуса 6 м и высоте 20 м номинальная мощность реактора не должна превышать 500 МВт (тепл.). При охлаждении корпуса водой или при встроенных в первый контур аварийных теплообменниках допустимая мощность реактора будет значительно выше.

В предлагаемой концепции МЖБР мощность реактора выбиралась исходя из размеров корпуса реактора, который можно изготовить в заводских условиях и доставить на строительную площадку АС водным и автомобильным транспортом. В качестве ориентировочных размеров приняты размеры страховочного корпуса реактора АСТ-500 диаметром 7,8 м и высотой 28 м. Предполагается, что остаточное энерговыделение в аварийных ситуациях будет отводиться путем естественной конвекции воздуха снаружи корпуса реактора (примерно 50% теп-

ла) и через встроенные в первый контур аварийные теплообменники, включаемые в работу на основании пассивного принципа, например по превышению температуры теплоносителя выше заданной.

На основании предварительных оценок номинальная мощность МЖБР ограничивается величиной 1500 МВт (тепл.) в случае использования встроенных аварийных теплообменников и величиной 600 МВт (тепл.) в случае аварийного съема тепла воздухом только с корпуса реактора.

Учитывая недостаточную проработанность вопросов по оценке экономической эффективности АС, состоящей из отдельных модулей "малой" мощности, можно привести следующее обоснование.

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АС С МЖБР

Создание мощной АС из относительно небольших модулей находится в резком контрасте с развитием больших моноблоков АС и в противоречии с тенденцией увеличения единичной мощности реактора, отстаиваемой в течение последних 20 лет. Большие реакторные блоки конструировались в ожидании значительных финансовых выгод. Однако недавние исследования, проведенные как у нас в стране, так и в ряде зарубежных стран, говорят о том, что масштабный фактор не является ни таким сильным, как ожидалось [6], ни единственно определяющим при выборе единичной мощности реактора.

АС, состоящая из модульных реакторов "малой" мощности, может компенсировать выгоды масштабного фактора за счет роста качества изготовления реакторного оборудования, включая корпус реактора, в заводских условиях и понижения объема работ на месте размещения АС и "непрямых" расходов, простоты конструкции и серийности изготовления. Принципиальным преимуществом модульной конструкции АС является такая возможность увеличения коэффициента готовности станции, значительное упрощение демонтажных работ после истечения срока службы реактора, удобство для работы в маневренных режимах, (отключение или включение отдельных реакторных модулей), большая приспособленность к спросу внешнего рынка (особенно стран с небольшим населением).

Следует отметить, что тенденция модульности энергетических блоков в настоящее время становится доминирующей в США и для тепловых электростанций, работающих на угле [6]. Тепловая электростанция большой мощности, состоящая из отдельных модулей, имеет, как правило, больший коэффициент использования мощности и обладает большой приспособленностью к изменениям условий работы. Приму-

щества модульных станций особенно велики при недостаточном резерве мощностей электросети (в районах с интенсивным электропотреблением) и при использовании станций как источника тепла, где резервирование особенно затруднено или дорого.

При условии одинаковой безопасности моноблочной АС большой мощности и АС, составленной из модульных реакторов, следует более внимательно отнестись к выбору единичной мощности реактора с учетом предполагаемых темпов развития АЭ и особенностей отечественной экономики. Учитывая высокую безопасность АС с МЖБР, можно рассчитывать на возможное ее использование и для выработки электроэнергии, и для получения теплофикационного пара и технологического тепла. Это позволит улучшить не только экономические показатели АЭ недалекого будущего, но и облегчить решение стратегической задачи обеспечения топливом АЭ на длительную перспективу.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Предварительные расчеты реактора МЖБР показали, что приемлемый перепад давления при среднем подогреве теплоносителя, равном 200°C , обеспечивающий движение натрия за счет ЕЦ, следует ожидать при диаметре твэлов, равном 9 мм, и относительном шаге треугольной решетки твэлов, равном $\approx 1,5$. Высота тягового участка (разность расположения высот выхода теплоносителя из активной зоны и входа его в теплообменник) при этом составит 20 – 25 м в случае 100%-ной ЕЦ и 10 – 15 м в случае уровня ЕЦ 30 – 40%. Уменьшение диаметра твэлов до традиционных для реакторов Super Phenix и БН величин 6 – 8 мм при том же относительном шаге твэлов приводит к резкому возрастанию сопротивления потоку теплоносителя, а увеличение относительного шага – к значительному изменению реактивности реактора между перегрузками вследствие снижения КВА.

Можно представить следующие основные характеристики компоновки активной зоны МЖБР:

Наружный диаметр оболочки твэлов	9,0 мм
Толщина оболочки твэлов	0,45 мм
Относительный шаг треугольной решетки твэлов	1,50
Объемные доли компонент активной зоны:	
топливо окисное ($\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$)	0,197
топливо сырьевое	0,109
конструкционный материал	0,075
теплоноситель	0,613
органы СУЗ	2,006
Высота активной зоны	150 см

Толщина торцевых экранов	35 см
Гидравлический диаметр ячейки твэлов	13,7 мм
Максимальная линейная нагрузка твэлов (в начале/конце кампании), Вт/см:	
окисных	450/370
сырьевых	140/280
Средний подогрев теплоносителя в максимально на- пряженной ТВС	260° С
Средняя скорость теплоносителя в максимально напря- женной ТВС	1,5 м/с
Перепад давления теплоносителя в ТВС с учетом входа и выхода из ТВС	0,008 МПа

Гидравлическое сопротивление ТВС составляет менее 0,01 МПа, что более чем в 50 раз меньше гидравлического сопротивления ТВС в традиционных активных зонах реакторов БН [7].

Для выбранного диаметра и шага твэлов, дистанционирование которых может быть осуществлено с помощью дистанционирующих решеток, возможно использование бесчехловых ТВС. Основанием для этого может послужить слабая зависимость нейтронного баланса при замене стали на значительно больший объем теплоносителя, положительный опыт работы бесчехловых ТВС в реакторах типа ГВЭР и в быстром натриевом реакторе DFR (Англия).

Рассмотренная компоновка активной зоны с низкой долей конструкционных материалов $\leq 10\%$ расширяет возможности получения $K_{\text{в}} \geq 1$ и снижения пустотного эффекта реактивности (до допустимой величины) по сравнению с традиционной компоновкой активных зон быстрых натриевых реакторов, имеющих долю конструкционных материалов $\geq 20\%$.

Обеспечение практически постоянного уровня реактивности по кампании и долговременной работы реактора на номинальной мощности (более 1 года) без перегрузок достигается за счет использования активной зоны с внутрикассетной гетерогенностью [2]. При этом обеспечивается высокий коэффициент воспроизводства $K_{\text{в}} \approx 1,5$ и высокий уровень избыточной наработки плутония, равный $140 \text{ кг } {}^{239,241}\text{Pu}/\text{ГВт(тепл.)}\cdot\text{год}$. Нейтронно-физические характеристики МЖБР мощностью 1500 МВт (тепл.) следующие:

Тепловая мощность реактора	1500 МВт
Максимальная глубина выгорания окисного топ- лива	10 т.а. %
Кампания ТВС	980 эф.сут.
Возможный интервал работы между перегрузками	490 эф.сут
Максимальная повреждающая доза облучения обо- лочек твэлов	70 сна

Коэффициент воспроизводства (среднестационарное состояние)	1,5
Составляющие коэффициента воспроизводства:	
активная зона	1,05
торцевые экраны	0,15
боковой экран	0,30
Избыточная наработка $^{239,241}\text{Pu}$	0,14 т/ГВт (тепл.) .год
Удельная нагрузка $^{239,241}\text{Pu}$ в активную зону	2,2 т/ГВт (тепл.)
Изменение реактивности за время между перегрузками	$\sim 0\% \Delta (1/k)$

Необходимо отметить, что использование плотного сырьевого металлического урана в гетерогенной компоновке не является единственным решением для обеспечения высокого КВ и КВА. Близкой по конечному эффекту является компоновка с окисно-карбидной внутрикассетной гетерогенностью, которая незначительно уступает по воспроизводству, однако отличается более простой технологией изготовления сырьевых твэлов и экспериментально доказанной их высокой работоспособностью для условий работы реактора МЖБР.

Результаты расчетов температурного режима работы оболочек твэлов МЖБР следующие, °С:

Температура натрия на входе в ТВС	320
Средний подогрев теплоносителя в реакторе	200
Максимальный подогрев теплоносителя в ТВС	260
Перепад температуры в пограничном слое теплоносителя на выходе из активной зоны	10
Перепад температуры в оболочке твэла на выходе из активной зоны	9
Максимальная температура оболочек твэлов (без учета факторов неопределенности):	
окисных	600
сырьевых	570

При выборе компоновки и теплогидравлических характеристик активной зоны обеспечивались максимальные температуры оболочек твэлов не выше 620°С при работе реактора на номинальной мощности. Это делало возможным использование в качестве материала оболочек твэлов радиационно стойкой стали ферритно-мартенситного класса. Применение этих сталей и пониженный флюенс нейтронов в гетерогенной активной зоне по сравнению с гомогенной активной зоной дают основания для увеличения глубины выгорания топлива до величины, превышающей 10% т.а. [2].

Удельная топливная нагрузка в МЖБР выше, чем в традиционных

реакторах БН вследствие увеличения диаметра твэлов и гетерогенной компоновки активной зоны. В то же время различие в топливных загрузках в цикле выражено слабее из-за увеличения длительности кампании.

Расчетный анализ показал, что в конверторном режиме удельные расходы на подпитку МЖБР при максимальном выгорании топлива, равном 10% т.а., вдвое превышают расход топлива на подпитку реактора типа ВВЭР-1000. Однако при повышении максимального выгорания топлива до 15% т.а. расходы топлива на подпитку отличаются лишь на 30%. При осуществлении рецикла даже при работе МЖБР на урановом топливе (коэффициент конверсии КК $\approx 0,95$) расходы топлива по сравнению с реактором типа ВВЭР снизятся на порядок и в несколько раз увеличится производство плутония.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ МЖБР

Современные требования к безопасности АС и ядерных реакторов выработаны на основе сочетания детерминистского подхода и методологии вероятностного анализа риска тяжелых аварий, которые могут привести к существенным радиоактивным выбросам. Оба метода взаимно дополняют друг друга [4, 5]. В работе [1] с учетом анализа сложившихся в мире представлений о недопустимых уровнях облучения населения, персонала и загрязнения окружающей среды с учетом реальных ущербов от имеющих место аварий и ожидаемых темпов развития ЯЭ сформулированы ограничения к значениям вероятностей тяжелых аварий на АС:

— не выше 10^{-5} 1/реакторо-год для аварий с разрушением активной зоны реактора и непревышением установленного допустимого уровня радиоактивного выброса — локализацией радиоактивности;

— не выше 10^{-7} 1/реакторо-год для аварий с разрушением реактора и выбросом радиоактивности выше допустимого уровня.

Необходимость удовлетворения таким жестким требованиям приводит к поиску особо надежных средств защиты, тщательному их подбору с ранжированием по степени надежности. При этом основной акцент в повышении безопасности, как уже отмечалось выше, связан с увеличением устойчивости к авариям самого реактора — основного источника ядерно-опасных и сопутствующих им процессов с выделением больших энергий и радиоактивных материалов.

Анализ реакторных средств защиты показывает, что наиболее надежными и экономичными оказываются средства, которые способны действовать на основе физических и других законов природы непосредственно в элементах реактора и, в отличие от традиционных активных

защитных средств, не требуют подвода энергии извне. К ним в первую очередь относятся так называемые внутренне присущие свойства безопасности реакторных компонентов, проявляющиеся при сочетании ядерно-физических, теплогидравлических, химических, прочностных и других свойств, а также определенных качеств реальных конструктивных элементов (устройств). К надежным средствам могут быть отнесены и пассивные средства защиты, в том числе пассивные средства теплоотвода, воздействия на реактивность, если аварийные ситуации не могут приостановить их действия и если они не требуют подвода извне энергии, постоянно готовы к работе, не требуют вмешательства эксплуатационного персонала. Таким образом, проблему самозащитенности реактора можно и следует решать на возможно более ранних этапах проектирования, когда уже известен возможный набор физических принципов, лежащих в основе организации процессов выделения и распределения энергии, ее отвода от топливных элементов и передачи внешнему носителю.

Методика количественного анализа вероятности тяжелых аварий на АС пока не обладает необходимой достоверностью, однако для конструкций реакторов, в которых плавление топлива исключается за счет самозащитенности, надежность оценки средней вероятности существенно повышается даже с учетом возможных внешних воздействий (например, землетрясения, диверсии).

Устойчивость к авариям в МЖБР связана со следующими их качествами:

- высокий уровень естественной циркуляции теплоносителя;
- низкое давление в корпусе реактора;
- низкая энергонапряженность активной зоны;
- большая теплоаккумулирующая способность контуров;
- высокая степень заводской готовности;
- отсутствие ксенонового отравления и соответствующей нестабильности;
- надежность предсказания характеристик, связанная с опытом эксплуатации реакторов БН;
- наличие страховочного кожуха, позволяющего сохранить активную зону под слоем теплоносителя при авариях, связанных с разгерметизацией основного корпуса реактора;
- отсутствие гидроударов в активной зоне, приводящих к снижению работоспособности твэлов;
- упрощение конструкции первого контура реактора;
- отсутствие изменения реактивности при выгорании топлива за счет стабилизации состава, облегчение "веса" стержней, компенсирующих запас реактивности на выгорание;

- стабильность нейтронного поля во времени;
 - устойчивая отрицательная обратная связь при возмущениях по мощности и температуре, определяемая практически мгновенными составляющими: доплер-эффектом и аксиальным расширением топлива;
 - хорошая работоспособность оксидных ТВЭЛов при глубоких выгораниях, медленное увеличение размеров разуплотнений ТВЭЛов, возникающих в процессе эксплуатации, отсутствие при этом выноса опасных количеств топлива в теплоноситель;
 - низкая коррозионная активность натрия;
 - большой запас теплоносителя до кипения ($\sim 400^\circ\text{C}$);
 - незначительное ухудшение коэффициента теплоотдачи при переходе в режим естественной циркуляции;
 - возможность длительного съема остаточных тепловыделений за счет естественной циркуляции во всех контурах;
 - удержание натрием и улавливание холодными ловушками значительной доли радиоактивных осколков деления в случае выхода последних из топливных элементов в теплоноситель;
 - исключение без плотных чехлов топливных сборок аварий с перекрытием расхода теплоносителя через ТВС;
 - увеличение отрицательных температурных эффектов реактивности, связанных с тепловым расширением элементов конструкции.
- Отрицательными качествами МЖБР с точки зрения безопасности являются:

- химическая активность натрия при взаимодействии с водой и воздухом (пожароопасность);
- большие термические напряжения из-за больших подогревов (надежность);
- высокое обогащение топлива связано с возможностью образования вторичных критмасс;
- высокий флюенс нейтронов в быстром реакторе (формоизменение и охрупчивание);
- существование области положительного пустотного эффекта реактивности.

Несмотря на множественность возможных технических причин (инициаторов) аварий на АС, к тяжелым авариям в условиях невозможности принудительного останова реактора приводят следующие процессы:

- 1) потеря потока (расхода) теплоносителя (или изменение расхода теплоносителя от номинального принудительного до характерного для естественной циркуляции в результате обесточивания насосов) – LOFWs;
- 2) потеря теплового стока к внешней среде, в результате чего выходные и входные характеристики теплоносителя сближаются, а расход

его через активную зону соответствует уровню естественной циркуляции для данного режима – LOHSWS;

3) отклонение параметров теплоносителя на входе в реактор по техническим причинам, например максимальное снижение температуры при сохранении расхода – OVCWS;

4) несанкционированный ввод избыточной реактивности в реактор, например, за счет самохода стержней регулирования, изменения плотности теплоносителя, попадания в активную зону посторонних веществ – TOPWS;

5) потеря теплоносителя и отсутствие средств для снятия остаточного тепловыделения;

6) локальное ухудшение условий теплосъема с возможным изменением фазового состояния топлива и теплоносителя;

7) внешние воздействия и возможность высвобождения запасенной химической энергии.

При наличии страховочного корпуса реактора без плотных чехлов на тепловыделяющих сборках активной зоны, при выполнении на АС мероприятий пассивной пожаробезопасности вероятность последних трех из перечисленных выше аварий становится меньше 10^{-7} 1/реакторо-год. В связи с этим качества самозащищенности МЖБР анализируются на примере рассмотрения первых четырех тяжелых аварий и их комбинаций. Сравнительный анализ качества внутренней безопасности жидкометаллических реакторов выполнялся с помощью асимптотического баланса реактивности. Рассматривались характеристики безопасности реакторов "Суперфеникс" [7], БН [8], IFR [9, 10], МЖБР. В табл. 1 представлены характеристики перечисленных реакторов, используемые при анализе самозащищенности.

Учитывая (табл. 2), что асимптотическая самозащищенность является необходимым условием самозащищенности, можно утверждать следующее: оба рассмотренных типа традиционных быстрых реакторов (БН, "Суперфеникс") по отношению к тяжелым авариям (в условиях несрабатывания аварийной защиты) не обладают самозащищенностью и требуют для оценки реальной безопасности надежных количественных вероятностных исследований и базы данных для анализа риска.

Т а б л и ц а 1. Характеристики быстрых реакторов, влияющие на асимптотический анализ их безопасности

№ пп.	Характеристика реактора	Реакторы			
		БН	"Суперфеникс"	IFR	МЖБР
1	Средний подогрев теплоносителя, °С	200	150	135	150
2	Уровень ЕЦ, λ *)	0,07	0,25	0,10	0,50
3	Входная температура, °С	350	395	385	350
4	Максимальная температура, °С	650	610	570	545
5	Введенная реактивность, β	5	5	0,5	0,5
6	ПЭР, β	5	5	3	0,8
7	Мощностной эффект разогрева топлива, А, β	-1,6	-1,6	-0,26	-0,39
8	Мощностной эффект разогрева теплоносителя, В, β	-0,5	-0,4	-0,37	-0,26
9	Температурный изотермический коэффициент реактивности, С, $\beta/^\circ\text{C}$	-0,005	-0,005	-0,004	-0,0045

*) – уровень ЕЦ при номинальном подогреве.

Т а б л и ц а 2. Максимальная температура теплоносителя в тяжелых авариях быстрых жидкометаллических реакторов

№ пп.	Тяжелые аварии	Реакторы			
		БН	"Суперфеникс"	IFR	МЖБР
1	LOFWS	900	770	650	600
2	LOHSWS	900	850	590	540
3	OVCWS	550	420	530	530
4	TOPWS	900	900	680	660
5	(LOF + TOP)WS	900	900	800	710
6	(LOHS + TOP)WS	900	900	720	650
7	(OVC + TOP)WS	900	770	640	620
8	(LOF + TOP + DCP)WS	900	900	860	690

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что при должном уровне проботки МЖБР, отвечающих требованиям изложенной концепции, можно создать надежную АС, безопасность которой обеспечится самозащищенностью реактора к любому нарушению в работе или возмущению, не связанному с разрушением реакторного модуля, вероятность которого должна быть значительно меньше, чем $10^{-6} - 10^{-7}$ 1/реакторо-лет.

Простота конструкции реактора, возможность качественного изготовления в заводских условиях основных реакторных узлов, включая корпус реактора, возможное сокращение сроков строительства АС позволяют надеяться на экономическую эффективность АС с МЖБР в плане ближайших потребностей АЭ, а высокий уровень воспроизводства ядерного горючего позволит на длительное время обеспечить АЭ топливом.

Безопасность АС с МЖБР дает основания расширить сферу использования быстрых реакторов за счет внедрения их в теплоснабжение. Это в свою очередь поможет решить задачу бридинга ядерного горючего без повышения коэффициентов воспроизводства (более 1,5).

Очень важно, что при создании МЖБР могут быть использованы известные технические решения, широко используемые в реакторостроении конструкционные материалы и технологические процессы. В связи с этим разработка МЖБР может быть проведена в короткие сроки и с минимальными затратами.

Список литературы

1. Пономарев-Степной Н.Н., Слесарев И.С. Безопасность и эффективность ядерной энергетики — основа в работах над ядерными реакторами нового поколения. — В кн.: Перспективы развития ядерной энергетики. Тр. конф. МАГАТЭ, (21 — 25 сентября 1987). — Вена, 1987, с. 1 — 50.
2. Orlov V.V. et al. The concept of fast Sodium power reactor with in-assembly heterogenety., NEACRP-A-839 (Finland), 1987.
3. Орлов В.В. Ядерный бридинг и безопасность реакторов. — В кн.: Материалы мирового научного форума по энергетическим проблемам XXI века. — М., 1987, с. 1 — 17.
4. Алексашин П.П. и др. Развитие требований по безопасности и системы государственного надзора как основы безопасного развития ядерной энергетики. — Атомная энергия, 1987, т. 63, вып. 5, с. 306 — 310.
5. Farmer F.R. Reactor Safety and Siting: A proposed Rick Criterion. — Nucl. Safety, vol. 8, 1967, p. 539 — 548.

6. Technical Report on Status of Advanced LWR Design and Technology: Second Draft. – Vienna: IAEA, 1987.
7. Dejou A. et al. Superphenix-1. – Nucl. Europe, 1985, vol. 11, p. 17 – 39.
8. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 173 с.
9. Berglund R.C. et al. The General Electric Modular LMR-PRISM. – Madrid: ICENES-4, 1986.
10. Burke T.M. et al. Results of the 1986 FFTF Inherent Safety Tests. – Trans. Am. Nucl. Soc., 1989, vol. 54, p. 249.

**Редактор Г.Я. Кармадонова
Технический редактор С.К. Сведлова
Корректор Г.А. Матвеева**

Подписано в печать 09.02.89. Т-04194. Формат 60х90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Уч. изд. л. 1,0

Тираж 172. Цена 20 коп. Заказ 118. Индекс 3624

**Подготовлено к изданию и отпечатано
в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182, Москва, пл. Академика Курчатова**

Препринт ИАЭ-4804/4. М., 1989