

3. Ефанов А.И., Лаврухин В.С. Вопросы измерения реактивности на больших реакторах. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1979, вып. 3(7), с. 17—27.
4. Казанский Ю.А., Матвеев И.П., Тютюнников П.Л., Шокотько А.Г. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного решения уравнений кинетики. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 6, с. 387—389.
5. Баков А.Т., Казанский Ю.А., Кулабухов Ю.С. и др. Моделирование нестационарных нейтронных полей с целью выбора алгоритмов для цифровых реактиметров. — В сб.: Моделирование нейтронно-физических процессов в реакторах АЭС (тезисы докладов IV Всес. семинара по проблемам физики реакторов). М., ЦНИИатоминформ, 1985, с. 111—112.
6. Ваймугин А.А., Душин П.Г., Комиссаров О.В. и др. Нейтронно-физические характеристики реакторов БАТЭЦ (по результатам физических пусков четырех реакторов). — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 6, с. 382—386.

Поступила в Редакцию 29.01.99

УДК 621.039

СОПОСТАВЛЕНИЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ И НАТРИЕВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Сидоренко В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

В последние годы некоторые публикации, предложения и обсуждения как внутри страны, так и на международных кворумах были посвящены пропаганде внедрения в ядерную энергетику новой реакторной технологии — быстрых реакторов, охлаждаемых жидким свинцом*. Эти действия поддерживаются активными проектно-конструкторскими проработками с соответствующими административными решениями. В качестве стратегической цели авторы предложения имеют в виду будущее широкомасштабное развитие ядерной энергетики осуществлять на реакторах такого типа, поскольку только они могут удовлетворить требования перспективной энергетики. В связи с этим возникают два круга научно-технических проблем: определение стратегии развития ядерной энергетики, место в этом развитии новых поколений быстрых реакторов и другой круг — выбор оптимальной технологии таких быстрых реакторов.

Обсуждение стратегии должно быть предметом отдельных публикаций, базирующихся на основательных исследованиях. Мне представляется важным здесь подчеркнуть центральное положение стратегии, которое уже сейчас, по моему мнению, может считаться неоспоримым: будущая ядерная энергетика не может быть однокомпонентной, базирующейся только на реакторах одного типа. Многокомпонентность ядерной энергетики является неизбежным условием ее развития, также как обязательна и важна роль в этом развитии быстрых реакторов. В этом плане базовые требования к ядерным энергетическим установкам будущего периода широкомасштабного развития ядерной энергетики — безопасность и экономичность — применимы в равной мере к системам любых типов (на тепловых и быстрых нейтронах) и любого технологического назначения и масштаба, технические решения которых будут, естественно, различными.

Причиной появления в последнее время предложений о развитии новой реакторной технологии на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем является утверждение авторов, что натриевая технология исчерпала свои возможности усовершенствования по факторам экономичности и безопасности или, более того, обладает неустранимыми недостатками, исключающими ее использование в перспективной ядерной энергетике при широком применении быстрых реакторов.

*16-й Конгресс мирового энергетического совета, Токио, 1995, доклад 2.3; Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 2, с. 89; Nuclear Engineering and Design, 1997, v. 173, p. 33; Генеральная конференция МАГАТЭ, 1998, «круглый» стол; доклад на бюро ОФТПЭ РАН 10.06.98; Белая книга ядерной энергетики, 1998, НИКИЭТ.

При этом авторы предложения утверждают, что органические свойства нового теплоносителя и вытекающие из этого технические решения несут новое качество, удовлетворяющее требованиям будущего этапа ядерной энергетики и оправдывающее его форсированное внедрение. Основным требованием, которое предъявляется к свинцовой технологии быстрых реакторов, является такой набор свойств теплоносителя, активной зоны и ядерной энергетической установки в целом, который не только устраняет опасность ядерного энергоисточника, упрощает вследствие этого установку и, следовательно, гарантирует лучшие экономические показатели по сравнению с натрийохлаждаемой, но и позволяет переформулировать критерии безопасности, перейдя от понятий малой вероятности аварий и тяжелых радиационных последствий к понятиям детерминированного исключения тяжелых аварий и естественной безопасности реакторных установок. Аргументация такого утверждения опирается на якобы высокую степень решенности и проработанности имеющихся проблем реакторной технологии со свинцовым теплоносителем, что и позволяет авторам проекта рассматривать данное направление как подготовленное для практического внедрения взамен существующей технологии, которая, по их мнению, не может удовлетворить требования будущей ядерной энергетики.

Поэтому правомерность этих утверждений становится ключевым вопросом при рассмотрении предложения о внедрении нового теплоносителя.

Я хотел бы здесь остановиться на втором круге проблем — выборе технологии быстрых реакторов. В новых условиях при заметном изменении требований к размножающим характеристикам быстрых реакторов по сравнению с прошедшими десятилетиями в число рассматриваемой технологии помимо систем с жидкометаллическим охлаждением целесообразно снова включить системы с газовым охлаждением и с охлаждением водяным паром. Некоторое время назад группа экспертов по поручению ОФТПЭ РАН провела работу по сопоставлению двух видов технологии из набора возможных жидкометаллических теплоносителей: свинцовой и натриевой. Базовым материалом, представляющим свинцовую технологию, был концептуальный проект реактора БРЕСТ-300. В ходе изучения имеющихся материалов и дискуссий с членами экспертной группы у меня сформировалось определенное мнение, которое я хотел бы здесь изложить. Полагаю, что с ним согласны в главном и другие эксперты, работавшие в этой группе.

Сопоставление двух направлений в реакторостроении на быстрых нейтронах — натриевого и свинцового — следует проводить во всех видимых аспектах: возможность достижения желаемых показателей безопасности; экономические показатели при условии решения первой задачи; обоснованность этих перспектив; средства, необходимые для достижения поставленной цели; потребные этапы развития и внедрения новой технологии и требующиеся для этого соответствующие средства и время.

Ключевым вопросом может быть наличие принципиальных недостатков в каждой из этих видов технологии и доверие к способам их нейтрализации или устранения.

Два общих замечания предваряют конкретные замечания и сопоставление достоинств и недостатков двух видов рассматриваемой технологии.

Первое. Следует обратить внимание на некорректность утверждения о принципиально новом уровне безопасности только на основе декларируемых характеристик свинцовоохлаждаемого реактора. Рассмотрение реальной расшифровки заявленных качественных признаков безопасности (детерминированной и естественной) приводит к определенному набору конкретных понятий, свойств, ограничений, пределов и условий рассмотрения возможных состояний установки, которые идентичны принятым и освоенным подходам в обеспечении безопасности ядерных установок, и их результативность и надежность будет зависеть от качества, глубины проработки и обоснованности конструктивных и технологических решений, что свойственно всем типам реакторов. В этом отношении обращает внимание решение авторов об исключении промежуточного контура и размещении парогенератора с закритическими параметрами.

рами непосредственно в корпусе реактора. Это заведомо не способствует повышению уровня безопасности (тем более детерминированной и естественной) и требует гораздо более доказательного обоснования по сравнению с приведенным в проекте.

Что касается используемых понятий внутренне присущей или естественной и детерминированной безопасности, я уже говорил о недопустимости применения этих понятий к свойствам ядерной энергетической установки в целом. Мы вправе говорить о детерминированном исключении определенных опасных событий или состояний либо о внутренне присущих характеристиках или свойствах безопасности, что всякий раз требует убедительных обоснований и доказательств и должно учитываться в общем анализе безопасности ядерной установки.

Второе. Сопоставление реакторов на основе натриевого и свинцового теплоносителя может иметь лишь условный характер из-за несопоставимости уровня освоения этих видов технологии. Преимущества свинца, на которые указывают авторы, имеют в первую очередь характер ожидания и прогноза, в то время как преимущества натрия и возможность нейтрализации его видимых недостатков при дальнейшем совершенствовании характеристик и конструкций реакторных установок с натрием опираются на мировой опыт научного и практического освоения.

Рассмотрение имеющихся материалов о реакторных установках с натриевым и свинцовым теплоносителем позволяет дифференцировать их положительные и отрицательные свойства, влияющие в конечном счете на показатели безопасности и экономичности.

Фактически единственным принципиальным недостатком натрия, отличающим его от свинца и требующим для его нейтрализации системы технических мер и конструктивных решений и тем самым влияющим на экономические характеристики установки и ее предельные показатели безопасности, является его химическая активность по отношению к воде и кислороду воздуха.

При химической инертности свинца его принципиальными недостатками являются большая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам, большая плотность и высокая температура плавления. Эти свойства теплоносителя неизбежно усложняют условия эксплуатации и снижают надежность установки, повышая возможность опасных отказов в различных режимах эксплуатации, и, следовательно, обязательно проявятся в ухудшении безопасности и экономических характеристик как при создании, так и при эксплуатации промышленных установок.

Высокая температура кипения свинца создает значительный запас до изменения агрегатного состояния теплоносителя в тяжелых авариях, однако в текущем состоянии проектных проработок нет оснований ожидать существенного влияния этого фактора на безопасность свинцовых установок по сравнению с натриевыми.

Достоинства натриевого теплоносителя по сравнению со свинцовым (лучшие теплофизические свойства, низкая температура плавления, малая плотность и как следствие низкое давление в корпусе реактора, хорошая совместимость с конструктивными материалами и топливными композициями и др.) подтверждены большим опытом эксплуатации реакторных установок в разных странах и создают основу их высоких эксплуатационных показателей и базу для улучшения экономических характеристик.

Среди видимых недостатков — неоптимальные нейтронно-физические свойства натрия в быстром спектре нейтронов и активация первичного теплоносителя, ухудшающие экономические показатели топливного цикла, требующие оптимизации проектно-конструкторских решений, а также соблюдения определенных условий эксплуатации, но не создающие кардинальных проблем в развитии этого направления. Продемонстрирована возможность устранения некоторых важных недостатков существующих конструкций установок БН (положительный пустотный эффект и др.).

Недостатки свинцового теплоносителя, создавая комплекс проектно-конструкторских и эксплуатационных проблем, должны быть компенсированы или преодолены. Удается ли это сделать на приемлемом уровне экономичности, надежности и безопасности и какие для этого потребуются средства и время, должно быть проанализировано на самой ранней стадии проектирования.

В рамках концептуального проекта БРЕСТ-300 выполнен значительный объем работ в виде расчетного анализа, конструкторских проработок, отдельных экспериментальных исследований, однако научно-техническая обоснованность свинца в качестве теплоносителя реакторов в промышленном масштабе, тем более претендующих на основу широкомасштабной ядерной энергетики, явно недостаточна как по широте охвата и глубине проработки проблем, так и по представительности доказательств.

Сопоставление показывает, что использование натриевой технологии позволяет решить все или большинство практических задач, предлагаемых для перспективной ядерной энергетики применением свинцовоохлаждаемых реакторов. Объективное сравнение экономических показателей не может быть представлено в настоящее время вследствие непредставительности соответствующей базы данных о свинцовых реакторах (как о сооружении, так и об эксплуатации). Как показывает опыт многих десятилетий, нельзя сколько-нибудь серьезно опираться на оптимистические экономические характеристики установки, получаемые на таком уровне разработки, на каком находится разработка свинцового реактора.

Как уже сказано, основным недостатком натрия является его химическая активность во взаимодействии с водой и воздухом. Основные недостатки свинца связаны с высокой коррозионной активностью, большим удельным весом и высокой температурой плавления. Стоимость технических мер, в достаточной мере нейтрализующих эти недостатки в промышленных установках, может быть выявлена только при детальном проектировании и на основании практического опыта, в чем натриевая технология значительно опережает свинцовую.

Достижение декларируемого уровня безопасности свинцовоохлаждаемого реактора зависит от полноты и доказательности рассмотрения всех состояний и условий работы реактора и станции и качества принятых научно-технических, конструкторских и проектных решений и на настоящей стадии не может быть гарантировано.

Возможность технической реализации проекта свинцовоохлаждаемого реактора может быть определена только после проведения большого объема НИР и ОКР, включающего сооружение достаточно крупных и представительных инженерных стендов. Реализация такой программы потребует значительных финансовых затрат и времени, которые оценить по имеющимся материалам не представляется возможным.

Для дальнейшего широкого внедрения свинцовоохлаждаемых реакторов нужно решить комплекс проблем, связанных с практической реализацией их потенциальных достоинств, и получить достаточный положительный опыт.

Поскольку освоение новой реакторной технологии (свинца) потребует таких же средств и многостадийности, как и ныне освоенные (натрий, вода), которые интегрировали суммарные усилия всех ведущих ядерных держав, успешное продвижение даже до стадии головного демонстрационного энергоблока возможно только при международном признании этой технологии и участии других стран.

В существующей экономической ситуации в России расходование сколько-нибудь значительных средств в настоящее время для разработки реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и форсированное развитие новой дорогостоящей технологии в одной стране при отсутствии доказанного набора весомых преимуществ по сравнению с имеющимися возможностями совершенствования развитых направлений (в области быстрых реакторов — натрий) нецелесообразно. Это не исключает поиск перспективных технических решений в процессе формирования долгосрочной стратегии развития ядерной энергетики и в рамках оптимального расходования средств на задачи ближней и дальней перспективы.