

Очередные проблемы разработки окисных ТВЭЛов быстрых энергетических реакторов

В развитии ядерной энергетики одно из главных мест занимает создание атомных электростанций с быстрыми реакторами. Во всех странах достигнуты значительные успехи в техническом осуществлении проектов таких реакторов. Достаточно отметить, что три страны — СССР, Англия и Франция уже имеют опытно-промышленные установки мощностью порядка 300 млн. кВт (эл.) каждая, находящиеся в стадии освоения. Опыт эксплуатации этих установок и строящихся в СССР и США более мощных реакторов (БН-600 и FFTF) позволит в течение, по-видимому, ближайшего десятилетия накопить достаточно данных, необходимых для создания и ввода в строй крупных электростанций оптимальных параметров с быстрыми натриевыми реакторами-размножителями на окисном смешанном топливе.

В настоящее время ученые достаточно полно обмениваются результатами исследований, а также техническим опытом. Несколько крупных международных совещаний, прошедших в последнее время, явились как бы итоговыми по достижениям на 1975 г. и в то же время программными на будущее. К ним, в частности, следует отнести зимнее заседание Американского ядерного общества (Вашингтон, 27—31 октября 1974 г.)*, Первую европейскую ядерную конференцию (Париж, 21—25 апреля 1975 г.)** и совещание специалистов МАГАТЭ по повреждаемости топлива для быстрых реакторов (США, Сиэтл, 12—16 мая 1975 г.). Ранее выполненные работы в основном были направлены на демонстрацию возможностей быстрых реакторов и выявление основных проблем, в частности проблемы ТВЭЛов.

Ограниченность сведений о влиянии реакторных условий на свойства материалов не позволила сразу учесть все эффекты, которые стали проявляться по мере увеличения мощности, плотности нейтронных потоков и выгорания топлива в экспериментальных установках. К наиболее важным обнаруженным эффектам следует отнести пока еще недостаточно изученное в требуемом интервале облучения (до $4 \cdot 10^{23}$ нейтр./см² при $E > 0,1$ МэВ) разупрочнение конструкционных материалов; снижение длительной прочности и пластичности, ускорение высокотемпературного охрупчивания (аустенитных нержавеющей сталей) и ползучести. Вскрылось

явление нейтронного распухания конструкционных материалов, влияние исходной чистоты горючего и накопления осколков деления на совместимость горючего с материалом оболочки ТВЭЛ. В целом эти эффекты в сравнении с первыми оптимистическими оценками приводят к некоторому, не являющемуся критическим, снижению эффективности быстрых реакторов, точную величину которого пока оценить не удается.

При создании работоспособных ТВЭЛов, помимо конструкторско-технологических разработок, важными оказались внутри- и послереакторные исследования материалов и конструкций, аналитические исследования работоспособности, базирующиеся на экспериментальных данных о свойствах материалов, и анализ аварийных ситуаций с точки зрения их влияния на работоспособность установки в целом и безопасность эксплуатации. Экспериментальные исследования по совместным и самостоятельным программам ведутся учеными ряда стран: США, Англии, Франции, ФРГ, Японии, Италии и СССР. Многолетняя эксплуатация первых быстрых натриевых реакторов показала, что число выходов из строя ТВЭЛов на основе окисного и окисного смешанного топлива составляет менее 1% при выгорании более 10% тяжелых атомов. В отдельных случаях ТВЭЛы сохраняют работоспособность до выгорания 15—18% тяжелых атомов. Визуально обнаруживаются повреждения только в 0,1% от общего числа исследуемых ТВЭЛов.

Можно говорить о двух причинах возникновения повреждений: вследствие производственных дефектов и вследствие истощения работоспособности. Опыт изготовления 25 000 ТВЭЛов для реактора «Феникс» (Франция) показал, что при наличии квалифицированного технологического контроля производственные дефекты можно полностью исключить. Предел истощения работоспособности оценить с достаточной точностью пока не удастся, так как критерии повреждаемости окончательно не установлены и механизмы повреждения четко не сформулированы. К тому же экспериментальные данные о влиянии облучения на свойства материалов все еще недостаточно надежны. Вследствие этого предельное выгорание топлива в ТВЭЛх выбирается в значительной степени ориентировочно. Например, для французских реакторов «Радосия», «Феникс» и «Супер-Феникс» величина выгорания установлена равной 8; 6,5 и 9% тяжелых атомов соответственно. Критерии повреждаемости оболочки зависят от способа нагружения и могут быть определены, во-первых, по степени неравномерности пластической деформации материала и по величине предела пластичности, во-вто-

* См. ж. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 4, с. 268.

** См. ж. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 3, с. 230.

рых, по скорости деформации, в-третьих, по скорости установившейся ползучести, в-четвертых, по величине предела текучести материала.

Весьма подробно изучено взаимодействие сердечников из окисного смешанного горючего с оболочкой из аустенитных нержавеющих сталей, возникающее в области температур выше 500°C в основном вследствие воздействия накапливающихся в зоне реакции летучих осколков цезия, пода и теллура при высоком окислительном потенциале среды. Скорость межкуксталлитного проникновения высока до выгораний приблизительно 3% тяжелых атомов, а затем заметно снижается. При составах горючего, близких к стехиометрическому, глубина межкуксталлитного проникновения для глубоких выгораний может достигать 70—120 мкм, но она существенно меньше для докстехиометрического горючего. Однако при сверхстехиометрическом составе наблюдалось равномерное фронтальное окисление внутренней поверхности оболочки на глубину до 10 мкм без межкуксталлитного разрушения. Установлено, что снижение плотности горючего, повышение линейной мощности твэла и увеличение зазора между оболочкой и сердечником, особенно при наличии эксцентриситета, ведет к усилению взаимодействия. Исследования, проведенные в ФРГ, выявили зависимость межкуксталлитного проникновения от состава стали. Немецкие марки стали можно расположить в ряд по возрастанию взаимодействия (в скобках приведены иностранные аналоги маркам стали ФРГ): 1.4988 (AISI-318, FV-548); 1.4919 (AISI-319); 1.4981 (OX16N15M3B); 1.4970 (12R72HV). Различие в глубине межкуксталлитного проникновения для разных сталей составляло до 20%. Взаимодействие, вызванное присутствием осколков деления, не ведет к прямому повреждению твэлов с окисным горючим, однако ослабляет оболочку. Переход к использованию карбидного горючего не спасает от взаимодействия: в этом случае возможно науглероживание внутренней поверхности оболочки на глубину до 40 мкм.

Видимые повреждения твэлов представляют собой продольные трещины в верхней и средней частях оболочек, возникшие вследствие истощения работоспособности материала. Серединные трещины соответствуют области максимальной диаметральной деформации твэла и связаны, вероятнее всего, с постепенным нарастанием силового воздействия расширяющегося сердечника и давлением газа внутри твэла. Трещины в верхней горячей части, где окисное горючее практически полностью разупрочнено, связывают с нестационарными режимами работы твэла при значительной потере оболочкой пластичности (тепловой хрупкой). Отмеченные механизмы сопутствуют друг другу, и какой из них преобладает, пока установить трудно. При форсированных режимах облучения преобладает возникновение трещин в горячей части твэла. Трещины в средней части обычно образуются при диаметральных деформациях, заметно превышающих 1%. Допустимая деформация материала в верхней части вряд ли может быть принята более 0,1%. В нормальных условиях эксплуатации возникновение и развитие повреждения одного твэла мало влияет на всю сборку. Время с момента потери герметичности до раскрытия трещины может достигать нескольких месяцев. Исследования поведения твэлов с искусственными дефектами показали связь развития повреждения с образованием уранплутоната натрия под оболочкой. Только при снижении (потере) расхода теплоносителя или закупорке отдельных проходных сечений сборки возможно распространение поврежде-

ний на соседние твэлы; в случае окисного горючего авария локализуется в пределах одной сборки.

Отдельные механизмы, приводящие к истощению ресурса работоспособности твэлов, прослеживаются достаточно ясно, например, перераспределение горючего в объеме твэла, накопление осколков деления, газовыделение под оболочку и т. д. В то же время влияние нейтронного расширения оболочек, преобладающего над силовой деформацией в области ниже 525°C , а также роль радиационной ползучести далеко не изучены. Складывается впечатление, что основные усилия следует направить на создание высокопрочных и высокопластичных конструкционных материалов, хотя борьба с расширением имеет также немаловажное значение. Вполне возможно, что в будущем окажется целесообразным использовать малорасширяющиеся материалы только для кожухов сборок твэлов.

Большую роль в установлении механизмов повреждения твэлов играют теоретические исследования. Математические модели и программы расчетов, разработанные учеными различных стран, в основном адекватны. Их частные различия связаны, например, с интерпретацией и учетом влияния некоторых свойств, точностью и скоростью счета. Отдельные программы весьма усовершенствованы и описывают довольно тонкие явления (влияние изменения изотопного состава горючего, непрерывное изменение контактной теплопроводности, радиальную неравномерность нейтронного расширения и пр.). Эти полезные программы расчетов пока не могут быть использованы полностью в связи с отсутствием достаточных экспериментальных данных о свойствах материалов. Последнее затрудняет также установление предельных и статистически усредненных значений критериев работоспособности твэлов.

Особо следует остановиться на изучении поведения твэлов в нестационарных режимах работы. Имеются в виду быстропереходные процессы, связанные со срабатыванием аварийной защиты, отказом насосов первого контура, выбросом мощности реактора, частичной или полной блокировкой расхода теплоносителя через сборку твэлов и, наконец, с многократными изменениями уровня мощности. Цель этих исследований, значение которых трудно переоценить, — установление ограничений, способствующих сохранению работоспособности твэлов вплоть до возникновения аварийной ситуации. К подобным критериям могут быть отнесены, например, предельная пластическая деформация конструкционных материалов в различных температурных областях, при различных скоростях нагружения, различных дозах нейтронного облучения и степенях химического взаимодействия со средой; допустимые выбросы мощности; допустимые масштабы плавления горючего; разрыв оболочки газовым давлением при перегреве и т. п. Распространение стационарных и квазистационарных теоретических моделей на случай быстропеременных параметров требует серьезной доработки и тщательного сравнения аналитических результатов с экспериментом. При этом необходим, например, учет нестационарности газовыделения, перераспределения пористости в горючем, переноса массы при плавлении, нестационарности силового взаимодействия сердечника с оболочкой, скорости нарастания газового давления, которое может достигать сотен атмосфер, и т. д.

Рядом западных стран и Японией приняты совместные и частные программы исследований работоспособности твэлов в нестационарных режимах, включающие внутриреакторные эксперименты с выбросом мощности и потерей теплоносителя, в том числе исследования в це-

лях установления влияния быстропеременных процессов на гидравлические и теплофизические характеристики сборок твэлов. Планируется также вне реакторный разогрев твэлов, облученных до различных выгораний. Программы предполагают использование импульсного реактора TREAT (США), позволяющего осуществлять выброс мощности по заданной программе с визуальной оценкой процесса разрушения, а также петель французских экспериментальных тепловых реакторов, в которых, в том числе, планируются эксперименты с твэлами, предварительно облученными в быстром реакторе «Рапсодия». Отдельные эксперименты уже проведены. Наблюдалось вспенивание облученного горючего при расплавлении, разрушение оболочки газовым давлением в местах перегрева, оценено возрастание газового давления в твэле при выбросе мощности в реакторе TREAT. В результате предварительных исследований выяснилось, что разрушение твэлов в нестационарных режимах можно связать с быстрым выделением газа из расплавленного горючего. Существенную роль в нестационарном режиме начинает играть газовыделение из твердого горючего до его

расплавления, приводящее к дополнительному массопереносу; начало разрушения оболочки зависит от исходной структуры сердечника. Отмечается, что кратковременный выброс мощности не может привести к серьезным повреждениям оболочек твэлов.

Влияние работоспособности твэлов на безопасность эксплуатации быстрых реакторов связывают с возможностью распространения аварии (в том числе при аномальных режимах работы) за пределы сборки твэлов с охватом части активной зоны или всей зоны. Разрабатываются модели механизмов развития подобных гипотетических аварий для выявления условий полной локализации разрушений в пределах сборки твэлов, чтобы обеспечить возможность замены такой сборки без нарушения эксплуатационного графика реактора. Полагают, что при использовании окисного горючего уверенное определение местоположения, степени повреждения и безопасная замена сборки твэлов вполне осуществимы при условии, что будут разработаны необходимые измерительные средства, регистрирующие наличие и тип активности осколков деления в реакторе.

ГОЛОВНИН И. С.

Конференции и совещания

III Конференция по нейтронной физике

Конференция состоялась в Киеве 9—13 июня 1975 г. В ее работе приняли участие 300 советских ученых из 42 институтов и научных центров страны и 50 зарубежных представителей из 16 стран. С сообщениями и отдельными сообщениями выступили 92 докладчика. Работа проводилась на семи секциях, на которых рассмотрены наиболее актуальные вопросы нейтронной физики.

Потребности в ядерных данных и их оценка. Конференция начала работу с рассмотрения потребностей в ядерных данных для реакторной технологии, термоядерных реакторов, астрофизики и реакторной физики. Представленные доклады показали, что к настоящему времени сформулированы, получили технико-экономическое обоснование и доведены до научной общестественности потребности в ядерных и в первую очередь в нейтронных данных со стороны многих областей науки и техники. Наиболее обширны эти потребности в области реакторной технологии и защиты от проникающего излучения.

Л. Н. Усачев (ФЭИ, Обнинск) сообщил о разработке в Физико-энергетическом институте математического аппарата и комплекса программ экспериментальных исследований. При этом исходили из условий достижения необходимой точности в ядерных данных с минимальными затратами. В докладе М. Н. Николаева (ФЭИ, Обнинск) намечена стратегия достижения требуемой точности нейтронных данных, состоящая в оптимальном сочетании усилий в области микроскопических и интегральных экспериментов. Отмечены те направления работ на имеющихся в нашей стране экспериментальных установках, которые позволяют внести наиболее существенный вклад в дело обеспечения первоочередных потребностей. Г. Е. Шаталов (ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва) изложил вопросы влияния ядерных констант на нейтронно-физический расчет бланкета

термоядерного реактора. Интерес к нейтронным данным со стороны ученых, занятых разработкой термоядерных реакторов, с каждым годом возрастает. Большой интерес вызвало развертывание работ по оценке ядерных данных. Представлены два полных файла (набора данных) по ^{235}U (ИАЭ АН БССР, Минск) и по железу (ФЭИ, Обнинск) и ряд других работ по оценке сечений никеля, хрома, золота, углерода и других важных конструкционных материалов, а также стабильных ядер — осколков деления.

Следует отметить вклад в новую информацию по оценке ядерных данных, сделанный в докладе Ж. Салви (Франция), в котором дана методика оценки сечений захвата, деления, неупругого рассеяния для тяжелых ядер в диапазоне энергий 3 кэВ — 1 МэВ, а также сечений процессов n, xp и n, xnf в диапазоне энергий 2—20 МэВ.

В настоящее время, как это следует из ряда докладов, осуществлено автоматическое получение групповых констант из файлов микроскопических оцененных данных (первая очередь системы СОКРАТОР), завершена разработка методики подгонки ядерных данных по интегральным экспериментам на основании полученных групповых констант.

Интерес вызвал доклад Н. А. Власова (ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва) о нейтронных реакциях в звездах *. Указана важность точного определения сечений радиационного захвата нейтронов в области энергий от 30 до 200 кэВ для решения фундаментальной проблемы происхождения элементов.

Фундаментальные свойства нейтрона. Эта секция организована впервые. Итоги ее работы показали, что включение такого раздела в программу конференции вполне целесообразно, так как наряду с чисто приклад-

* См. ж. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 2, с. 103.