

длин наметить такие критерии вакуумной подготовки, при выполнении которых возможен не только контроль, но и управление составом остаточных газов в диоде. В этих условиях удастся достичь длительного и воспроизводимого улучшения вольт-амперных характеристик путем добавки в рабочий зазор ТЭП очень небольшого количества чистого кислорода.

Большой интерес вызвали выступления руководителя советской делегации, первого заместителя председателя Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР И. Д. Морохова на генеральной дискуссии о направлении работ по термоэмиссионному преобразованию энергии в СССР и доклад В. А. Кузнецова на конференции о разработке и испытаниях советских термоэмиссионных реакторов «Топаз-1» и «Топаз-2». В Советском Союзе исследуются термоэмиссионные реакторы малой (единицы — десятки киловатт) и большой (порядка мегаватт) мощностей. С точки зрения практической реализации исследования сосредоточиваются на реакторах малой мощности без бустерной зоны с гидридным замедлителем, т. е. на более простых, экономичных и в то же время позволяющих отработать специфичные для ТЭУ общие вопросы. Главная задача проведенных испытаний — подтвердить работоспособность групп ЭГК в составе реактора и воспроизводимость параметров от образца

к образцу. Испытания дали большую информацию о поведении ЭГК в активной зоне (общая наработка в реакторе составила около 1 млн. элементо-часов). Каждый из реакторов проработал в режиме генерирования мощности около 15000 ч. Предполагается еще нескольких наземных испытаний реактора «Топаз».

Работы советских специалистов по фундаментальным проблемам ТЭП заняли на конференции ведущее место. Аналитические модели низковольтной дуги, роль которых в последнее время повышается в связи с разработкой методов диагностики ТЭП по вольт-амперным характеристикам, исследование стационарных и динамических свойств плазмы ТЭП, вопросы устойчивости, исследование вольт-амперных характеристик, адсорбционные явления, материаловедческие вопросы — вот основные направления, по которым были представлены работы от СССР.

Конференция явилась важным этапом в развитии термоэмиссионного метода. Она подвела итоги основным достижениям в реализации национальных программ и позволила ведущим специалистам обсудить результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских, производственно-технологических и экономических исследований.

Д. В. КАРЕТНИКОВ

Совещание экспертов МАГАТЭ по газоохлаждаемым быстрым реакторам

24—28 июля 1972 г. в Минске по приглашению Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР состоялось совещание экспертов МАГАТЭ по проблемам газоохлаждаемых быстрых реакторов. В нем приняли участие 30 представителей от 10 стран и трех международных организаций.

Рассмотрены современное состояние исследований и разработок по газоохлаждаемым быстрым реакторам; сравнение их характеристик с характеристиками быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями; оценка затрат и усилий, необходимых для развития газоохлаждаемых быстрых реакторов-размножителей; перспективы международного сотрудничества в этой области.

Был представлен и обсужден 21 доклад по быстрым реакторам-размножителям с гелием, CO_2 и диссоциирующим газом N_2O_4 в качестве теплоносителей. Отмечены успехи, достигнутые в последние годы в ряде стран в разработке высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением. Большое внимание было уделено обсуждению требований к перспективному быстрому реактору-размножителю особенно в отношении времени удвоения и обеспечения безопасности.

Участники совещания отметили, что быстрый реактор-размножитель с газовым охлаждением в принципе может обеспечить необходимое время удвоения (6 лет) и может рассматриваться как направление, резервное или параллельное жидкометаллическим быстрым реакторам-размножителям.

По вопросам использования горючего и величины времени удвоения были изложены две концепции. Ряд участников считает, что основная задача быстрых реакторов-размножителей в предстоящие 20—25 лет — производство наиболее дешевой электроэнергии, конкурирующей с электроэнергией от АЭС с тепловыми

реакторами, а не решение проблемы сокращения потребления природного ядерного топлива. Эти специалисты считают, что быстрые реакторы-размножители должны оптимизироваться не на минимальное время удвоения, а на минимальную стоимость электроэнергии при времени удвоения более семи-восьми лет.

Концепция другой группы основывается на том, что быстрые реакторы-размножители уже в ближайшие 20—25 лет должны решить сырьевую проблему, в связи с чем их время удвоения должно быть существенно меньше времени удвоения мощностей обычной и ядерной энергетики.

В докладах С. М. Фейнберга и Н. Н. Пономарева-Степенного (СССР) были предложены два варианта осуществления быстрого реактора-размножителя с гелиевым охлаждением: 1) малый быстрый реактор-размножитель с плутониевой активной зоной, для которого можно ожидать получения времени удвоения порядка трех лет при давлении гелия 300—400 атм и температуре на выходе из реактора 700°С (жесткий спектр нейтронов и высокое значение коэффициента воспроизводства $K_{\text{В}} \approx 2$); 2) большой быстрый реактор-размножитель с разбавленной активной зоной с продольно-поперечным движением газа в кассетах из микровзлов с $K_{\text{В}} \approx 1,6$ и давлением гелия 150—200 атм. В этих докладах рассмотрено несколько вариантов конструкции АЭС с малой активной зоной: реактор с мультиплутониевой зоной (несколько плутониевых зон размещаются внутри общего блока отражателя из металлического урана в общем металлическом или бетонном корпусе); модульная схема АЭС (объединяются несколько (5—12) реакторов с плутониевой активной зоной, каждый из которых размещен в отдельном металлическом корпусе диаметром ~ 2 м). Корпуса реакторов вместе с парогенераторами, газодув-

ками и т. д. помещаются в железобетонном корпусе, т. е. имеет место интегральная компоновка.

П. Фортескье (США) сделал обзор работ компании «Галф Дженерал Атомикс» по газовым быстрым размножителям. Он представил компоновку и конструкции основных узлов демонстрационного быстрого реактора с гелиевым теплоносителем мощностью 300 *Mвт* (эл.) и привел основные характеристики прототипа быстрого гелиевого коммерческого размножителя мощностью 1000 *Mвт* (эл.). Эти характеристики были сравнены с соответствующими характеристиками жидкометаллических быстрых размножителей. По мнению Фортескье, при температуре газового теплоносителя, не превышающей температуру натрия, гелиевый размножитель обеспечит решение проблемы безопасности и обслуживания. В этой работе компания использует большой опыт, накопленный ею при создании тепловых реакторов с газовым охлаждением. Компания считает целесообразной работу газового быстрого реактора-размножителя мощностью 1000 *Mвт* (эл.) в комплексе с четырьмя высокотемпературными газовыми тепловыми реакторами мощностью 1000 *Mвт* (эл.) каждый.

Оценка современного состояния и перспектив развития быстрых газовых размножителей была дана в докладах представителя Европейской ассоциации газовых реакторов-бридеров Шермана. В ассоциацию входит 15 организаций из восьми европейских стран (Австрии, Бельгии, Швейцарии, ФРГ, Франции, Великобритании, Италии, Нидерландов). В ее задачи входит оценка потенциальных возможностей газовых быстрых размножителей, разработки их предварительных проектов, а также координация работ и обмен информацией по этой тематике.

В настоящее время рассматриваются три эскизных проекта реакторов мощностью по 1000 *Mвт* (эл.): со стержневыми твэлами и температурой гелия на выходе 587° С, с горючим в виде микротвэлов и температурой гелия на выходе 700° С и с горючим в виде микротвэлов и температурой CO₂ на выходе 650° С. Во всех трех вариантах используется интегральная компоновка в корпусе из предварительно напряженного железобетона.

Очень большое внимание в программе работ Ассоциации уделено разработке и испытанию твэлов, топливных композиций (на основе окислов и карбидов плутония и урана) и конструкционных материалов. Показано, что газоохлаждаемый быстрый реактор со стержневыми твэлами по капитальным затратам близок к высокотемпературному газовому тепловому реактору.

Состояние работ по газовым быстрым реакторам-размножителям в ФРГ охарактеризовал М. Далли-Донне. В 1974 г. ядерные центры ФРГ в Карлсруэ и Юлихе приступили к выполнению совместной программы на 1974—1974 гг. на общую сумму в 6,5 млн долл. по газовым быстрым размножителям. Около 90% этой суммы предназначено для разработки эскизного проекта реактора мощностью 1000 *Mвт* (эл.) с гелиевым охлаждением, вентилируемыми твэлами из окисного горючего с покрытием из нержавеющей стали. АЭС с газовым быстрым реактором выполняется по двухконтурной схеме с паровой турбиной. Остальные 10% идут на перспективные исследования (ванадиевые покрытия твэлов, микротвэлы в покрытиях, газотурбинный цикл).

В докладе указывается, что проект быстрого гелиевого реактора-размножителя с окисным горючим с покрытиями из нержавеющей стали и с паротурбинным циклом может быть реализован в ближайшем

будущем. Однако для этого необходимо следующие:

1) радиационные испытания топливных композиций и макетов твэлов в существующих исследовательских реакторах;

2) стендовые испытания термодинамических и газодинамических характеристик твэлов;

3) быстрое завершение эскизного и технического проектов и проведение на их основе детальных технико-экономических анализов и мер обеспечения безопасности по совершенным строгим требованиям.

Сотрудник Швейцарского федерального института реакторных исследований Г. Сарлос рассказал о выполняемых в Институте исследованиях.

Совместно со швейцарской промышленностью проводится анализ различных вариантов АЭС с быстрыми газовыми размножителями. В частности, рассматриваются одноконтурный вариант с газовой турбиной и двухконтурный — с паровой турбиной, интегральная и неинтегральная компоновки оборудования. Одноконтурный газотурбинный вариант с неинтегральной компоновкой оказался экономически наиболее выгодным.

Однако трудности в разработке и изготовлении оборудования приводят к варианту с двухконтурной схемой с паротурбинным циклом, который немного уступает одноконтурному газотурбинному варианту по экономическим показателям, но обладает преимуществами в технологии и в решении проблем безопасности.

Такака (Япония) отметил, что разработка быстрого размножителя с газовым охлаждением ведется в Японии с 1967 г. С 1970 г. работа сконцентрирована на разработке реактора мощностью 1000 *Mвт* (эл.) с гелиевым охлаждением со стержневыми твэлами из двуокиси урана и плутония с покрытием из нержавеющей стали и двухконтурной схемой с паротурбинным циклом.

В докладах Комеллини (Италия) и Видера (Швеция) было изложено состояние работ по быстрым газоохлаждаемым реакторам в этих странах.

Международному сотрудничеству западноевропейских стран в рамках Европейского агентства по атомной энергии был посвящен доклад представителя этой организации Л. Боксера.

Большой интерес вызвали доклады А. К. Красина, В. Б. Нестеренко, А. М. Сухотина и Г. А. Шароварова по различным аспектам разработки газоохлаждаемых быстрых реакторов с диссоциирующими газами в качестве теплоносителей. В докладах показано, что результаты теоретических и экспериментальных исследований быстрого реактора мощностью 1000 *Mвт* (эл.) с теплоносителем и рабочим телом из N₂O₄, проводимых в Институте ядерной энергетики АН БССР, позволяют надеяться, что АЭС с таким реактором будет отвечать всем требованиям, предъявляемым к быстрым реакторам-размножителям. Для такого реактора при давлении в контуре 160 атм и температуре газа на выходе 350—450° С возможно получение к. п. д., равного 30—33%, и времени удвоения 6—7 лет.

Во время посещения Института ядерной энергетики АН БССР участникам совещания были показаны стенды для изучения различных вопросов, связанных с применением N₂O₄ в качестве теплоносителя для реакторов и рабочего тела турбины.

Совещание пришло к выводу, что работы по быстрым газовым реакторам, ведущиеся в настоящее время во многих лабораториях стран, участвовавших в совещании, представляют перспективное направление развития ядерной энергетики. Признано целесообраз-

ным продолжать и интенсифицировать исследования в этом направлении.

С этой целью совещание рекомендует МАГАТЭ рассмотреть пути обеспечения дальнейшего обмена информацией между странами, заинтересованными в развитии газовых реакторов-размножителей, либо в рамках существующей Международной рабочей группы по быстрым реакторам, либо другим удобным способом.

В целом совещание показало, что интерес к быстрым реакторам с газовым охлаждением растет и что в ряде стран развиваются научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы, направленные на создание прототипных установок.

Материалы совещания будут опубликованы МАГАТЭ.

Н. М. СИНЕВ, В. М. ШМЕЛЕВ

VI Международный симпозиум по влиянию облучения на конструкционные материалы

С 26 по 28 июня 1972 г. в Лос-Анжелесе (США) проходил VI Международный симпозиум по влиянию облучения на конструкционные материалы, организованный американским обществом испытания и материалов (ASTM).

В симпозиуме приняли участие ведущие специалисты американских национальных центров и фирм, проводящих исследования и разработки в области ядерной энергетики, а также представители исследовательских центров и университетов других стран. Было представлено 44 доклада по следующим разделам: 1) механика разрушения сталей корпусов реакторов; 2) влияние структуры и примесей на свойства корпусных сталей; 3) микроструктурные изменения под действием нейтронного облучения (образование пор, выделение фаз, образование пор под действием заряженных частиц); 4) математическое моделирование; 5) механические свойства (пластичность, ползучесть, усталость, прочность).

Доклады первого раздела были посвящены главным образом разработке основанных на механике разрушения критериев надежности корпусов и нахождению корреляций между этими критериями и стандартными механическими свойствами. Рассматривалась возможность определения коэффициента вязкости разрушения на обычных образцах типа Шарпи с предварительно введенной усталостной трещиной в надрезе, а также некоторые новые методы оценки сопротивления хрупкому разрушению (сопротивления распространению трещины) при статических и динамических испытаниях на изгиб.

Как известно, поведение различных малоуглеродистых и низколегированных сталей, используемых для корпусов реакторов, по отношению к охрупчиванию, вызываемому облучением, различно. В ряде докладов о влиянии состава корпусных сталей на их радиационную стойкость рассмотрен механизм действия отдельных примесей (меди, азота, углерода) с точки зрения их взаимодействия с дефектами. При этом подчеркивалась роль примесей азота и состояния, в котором он находится в стали (в твердом растворе или в связанном состоянии в виде нитридов и карбонитридов). Эти работы вносят известную ясность в понимание механизма вредного влияния меди на радиационную стойкость стали и на температурную устойчивость изменений, вызванных облучением.

Наиболее детально обсуждена проблема радиационного повреждения нержавеющей сталей и прежде всего образование пор и распухание сталей. Приведены данные о распухании нержавеющей сталей при облучении интегральными потоками нейтронов более 10^{23} нейтр/см² или эквивалентными этим потокам

дозами облучения тяжелыми ионами (C⁺, Ni⁺, Ta⁺) при температурах 450—700°С. Наиболее существенные выводы из этих докладов: 1) при интегральных потоках 10^{23} — $8 \cdot 10^{23}$ нейтр/см² насыщение эффекта распухания нержавеющей сталей отсутствует; 2) распухание увеличивается примерно в линейной зависимости от дозы облучения. По данным облучения в быстром реакторе (EBR-II) распухание стали 304 при интегральном потоке $1,1 \cdot 10^{23}$ нейтр/см² составило 11 об.% (Р. Фиш и др., США).

При облучении тяжелыми ионами сталей 304 и 316 дозами $3 \cdot 10^{23}$ нейтр/см² распухание достигает 30%. Сталь 304 распухает до 30 об.% при интегральных потоках до $2 \cdot 10^{23}$ нейтр/см².

Следует отметить, что предварительная деформация сталей снижает их распухание (в два-три раза по сравнению с аустенизированной) только в области температур менее 600°С (В. Джонстон и др., США). При интегральных потоках $(3 \div 4) \cdot 10^{23}$ нейтр/см² и температуре 625°С распухание практически одинаково как для аустенизированной, так и для предварительно холоднотемпературной сталей. Хотя все эти данные получены при облучении на ускорителях тяжелыми ионами, вряд ли может быть сомнение в их представительности. Проведенные подробные исследования показывают достаточно хорошую корреляцию между данными облучения в реакторе и на ускорителях в широком интервале доз облучения.

В этом отношении заслуживают внимания методы прямого измерения распухания тонких образцов, облученных на ускорителях. С помощью этих методов удалось показать достаточную представительность и количественный характер результатов, полученных при использовании электронной микроскопии на просвет.

Таким образом, представленные на симпозиуме результаты свидетельствуют о том, что при реализации проектов быстрых реакторов, рассчитанных на большие выгорания (интегральные потоки $(2 \div 4) \cdot 10^{23}$ нейтр/см²), могут встретиться некоторые затруднения, связанные как с выбором материала, так и с решением инженерных вопросов активной зоны реакторов. Следует отметить, что предварительная холодная деформация стали, казавшаяся ранее решением вопроса о распухании, при больших интегральных потоках и повышенных температурах оказывается недостаточно эффективной и может дать реальный выигрыш только при уменьшении температуры ниже 600°С.

Говоря о путях снижения распухания материалов за счет легирования, нужно отметить, что пока нет единой точки зрения на характер и механизм влияния легирующих компонентов на поведение материалов.