

снизило нейтронное поле в центральной части каналов и позволило уменьшить число разгерметизирующихся сборок в среднем по всем реакторам с 0,43 до 0,03%.

Вместе с тем были разработаны новые усовершенствованные твэлы «Canlub Fuel», в которых внутренняя поверхность оболочки покрыта специальной смазкой на основе графита (или силоксана). Лабораторными и реакторными испытаниями подтверждено, что такие покрытия снижают концентрации напряжений от взаимодействия горячего с оболочкой и подавляют коррозию под напряжением, защищая оболочку от проникновения иода. Предполагается, что внедрение таких твэлов позволит вернуться к прежней схеме загрузки реакторов и снизить процент разгерметизирующихся топливных сборок.

Для заваляковки мест соединений каналов разрабатывается новая методика, исключающая возможность возникновения высоких напряжений.

Для третьего и четвертого блоков АЭС «Пикеринг» и двух блоков строящейся АЭС «Брюс», где каналы трубы из сплава $Zr + Nb$ уже смонтированы, разработан способ релаксации напряжений (на ~50%) путем отжига при 300° С без демотажа каналов.

Особо следует отметить проводимую в рамках АЕСЛ комплексную программу изучения ползучести под облучением, включающую исследование релаксации напряжений в сплавах циркония, характера ползучести при одноосном и двухосном растяжении труб из циркониевых сплавов (циркалой-2, $Zr + 2,5\% Nb$) в различных термомеханических состояниях, оценку диаметальной ползучести полномасштабных канальных труб при их эксплуатации в реакторах. Эти исследования позволили оценить ресурс работы канальных труб из расчета максимально допустимой диаметальной ползучести 3% для всех канадских реакторов. Как предполагают, такой ресурс для реакторов NPD составит 60 лет, «Дуглас-Пойнт», первого и второго блоков «Пикеринг» — 23 года (циркалой-2), для третьего и четвертого блоков «Пикеринг» и четырех блоков «Брюс», где в качестве канальных используются холоднообработанные трубы из сплава $Zr + 2,5\% Nb$, — 50 лет и для реактора «Джентли-1» с трубами, прошедшими термическую обработку (закалка — холодная обработка — старение), — 36 лет (сплав $Zr + 2,5\% Nb$).

Результаты исследования ползучести позволяют

корректировать технологический процесс изготовления труб в целях повышения ресурса их работы.

Большой интерес вызывают исследования условий радиационного роста циркония и его сплавов в отсутствие приложенных напряжений, а также работы по установлению критической величины трещины на канальных трубах для различных условий эксплуатации. Последние позволили выработать и использовать на практике критерий «Обнаружение течи до разрушения», характеризующий безопасную эксплуатацию канальных труб.

Долгосрочная программа развития ядерной энергетики Канады предусматривает использование и совершенствование только уже выбранных к настоящему времени типов тепловых реакторов PHW и BLW с тяжеловодным замедлителем. Предполагается, что к 2000 г. с такими реакторами будут построены АЭС общей электрической мощностью 120 млн. кВт.

Разработка и строительство АЭС с быстрыми реакторами не предусматриваются. Не нашла дальнейшего развития и программа создания атомных реакторов с органическим теплоносителем.

Программа предусматривает переход на смешанное уран-плутониевое окисное горючее с низкой концентрацией плутония (0,5 вес.%), что позволит увеличить выгорание до 16 000 МВт·сут/т (вместо 8000 МВт·сут/т при использовании UO_2 природного обогащения). Как считают канадские ученые, это снизит потребление урана на ~40% и повысит экономичность реакторов. Проект реактора с использованием смешанного горючего уже разработан (замедлитель — тяжелая вода, теплоноситель — кипящая легкая вода).

Для будущих реакторов рассматривается также возможность использования $^{233}U - Th$ цикла. Для обеспечения этой программы в Чок-Ривере заканчивается монтаж технологической цепочки для производства смешанного уран-плутониевого горючего и твэлов на его основе в циркалоевой оболочке. Проектируется небольшой завод для производства твэлов на смешанном окисном горючем мощностью 2—3 т топлива в год.

Начато строительство двух заводов до производству канальных и твэльных труб, предусматривается увеличение производства тяжелой воды к 1979 г. до 3200 т в год (в настоящее время производится 1200 т в год).

КАЛАШНИКОВ В. В.

Состояние работ по термоэмиссионному преобразованию энергии во Франции

Делегация советских специалистов по термоэмиссионному способу преобразования тепловой энергии в электрическую в составе В. А. Кузнецова (руководитель делегации), В. И. Сербина, В. Н. Быкова, А. И. Куличенкова и Д. Л. Цепхладзе с 10 по 19 марта 1975 г. находилась во Франции с ответным визитом. Цель поездки — ознакомление с состоянием, уровнем и перспективами работ по термоэмиссионному преобразованию энергии. Делегация посетила ядерные центры в Сакле, Фонтене-о-Роз, Гренобле, а также лаборатории фирмы «Томсон-КСФ» в Везилии и Марсельского университета.

Как известно, в последние годы во Франции активно разрабатывался проект реактора-преобразователя термоэмиссионного типа СОНИА, который предполагалось установить в специальной капсуле на дне моря в зоне прибрежных нефтеносных шельфов для обеспечения электроэнергией оборудования подводных нефтяных скважин. Напомним, что реактор СОНИА включает в себя активную зону драйверного типа, в которую кроме ЭГК входят также твэлы типа МТН с горючим из уран-алюминиевого сплава в циркалоевой оболочке. Замедлителем нейтронов в реакторе служит вода и отчасти бериллий. СОНИА содержит 64 ЭГК, в каж-

дом из которых находится четыре диода. В качестве горючего применен кермет $\text{UO}_2\text{—Mo}$ (60% UO_2) с обогащением 25—93% по ^{235}U . Эмиттер — слои вольфрама с ориентировкой [100], нанесенный известным методом CVD на молибденовую поликристаллическую трубку — оболочку катода; коллектор — сплав ниобия с 1% циркония; изоляция из окиси алюминия. Максимальная электрическая мощность реактора 37 кВт при суммарной тепловой мощности 2 МВт.

Значительные успехи были достигнуты во Франции по разработке специальной топливной композиции для катодов электрогенерирующих элементов. Эти работы были сосредоточены в основном в Гренобле. В частности, была разработана и всесторонне испытана керметная композиция ($\text{UO}_2 + \text{Mo}$), содержащая свободный объем около каждой окисной частички, при суммарной пористости кермета ~15%. Показано, что такая топливная композиция обладает большой устойчивостью по отношению к набуханию при высоких температурах (за 9200 ч при 1600°С и выгорании 32 000 МВт/т диаметр образцов увеличился всего на 0,5 %).

Фирмой «Томсон-КСФ» и Центром в Сакле хорошо освоена технология газофазного осаждения вольфрама на молибдене. Современная технология обеспечивает практическое отсутствие взаимодиффузии молибдена и вольфрама, что достигается тщательной подготовкой поверхности молибдена и его высокой чистотой. Отработана технология сборки ЭГК в условиях вакуума 10^{-6} — 10^{-7} торр; создана технологическая цепочка для серийного производства ЭГК. Для тепловых внеакторных испытаний ЭГК в Сакле и фирмой «Томсон-КСФ» созданы специальные высокотемпературные установки с высоким вакуумом и высокой степенью автоматизации процесса испытаний. Поддержание параметров испытаний и регистрация данных о режиме испытания осуществляются с помощью ЭВМ. Максимально достигнутый ресурс работы модуля ЭГК на тепловом стенде в Сакле составил 40 000 ч. Удельная выходная электрическая мощность в течение всего ресурса практически не изменялась и составляла ~5 Вт/см².

В реакторе «Тритон» в Фонтене-о-Роз были испытаны 12 ЭГК серии «Хеопс», каждый из которых состоял из трех элементов. В первых ЭГК каждый ЭГЭ имел свой индивидуальный источник паров цезия на основе цезированного графита. Большой разброс температуры источников паров цезия и неоптимальность этих температур в целом не позволили получить проектную мощность ЭГК. Последние шесть ЭГК имели один источник паров цезия на канал в виде подогреваемой жидкой ванны. Максимальная выходная электрическая мощность ЭГК в серии испытаний «Хеопс» составляла 500 Вт при среднем удельном тепловыделении ~32 Вт/см²; КПД достигал ~10%, максимальный ресурс ~900 ч. Основная причина выхода приборов из строя — разгерметизация рабочего объема. К середине 1974 г. был полностью подготовлен эксперимент «Диотен» по групповому испытанию 16 ЭГК.

Заслуживает внимания широкое использование нейтронно-графического контроля за состоянием ЭГК (и других облучаемых образцов) непосредственно в ходе реакторных испытаний. Этот метод применяется во всех ядерных центрах Франции в двух вариантах: 1) совместное облучение образца и радиатора (диспрозий, гадолиний) пучком нейтронов реактора с последующей экспозицией фотопленки в контакте с облученным радиатором; 2) совместное облучение образца и нитроцеллюлозной пленки, покрытой боратом лития, с ее последующей обработкой и получением нейтроно-

графического снимка непосредственно на этой пленке. В первом случае получаемое изображение более контрастно, во втором — точнее передает геометрические размеры. Как правило, применяется комбинация обоих вариантов.

Примерно в середине 1974 г. программа по термоэмиссионному преобразованию энергии во Франции претерпела резкое изменение. Работы по созданию реактора СОНИА были полностью прекращены по существу на заключительной стадии. Пересмотр национальной программы по этой проблеме явился следствием общей ревизии программы работ по энергетике. Ревизия была проведена во Франции в 1974 г. в связи с энергетическим кризисом. В новой программе предусматривается значительное увеличение удельного веса атомных электростанций в выработке электроэнергии (к 1985 г. до 72% главным образом за счет реакторов типа ВВР) и существенное снижение вклада в общий энергетический баланс электростанций, работающих на органическом топливе (до 14%). В предстоящие 10 лет развитие электроэнергетики предполагается исключительно за счет ввода атомных электростанций. Усилия всех ядерных центров Франции направлены сейчас на реализацию новой программы. Кроме того, на судьбу французского термоэмиссионного реакторо-преобразователя повлияло также неподдержание этого проекта нефтяниками в связи с появлением конкурирующих проектов в виде дизельных электростанций на бухах.

В настоящее время в Сакле, Гренобле, Фонтене-о-Роз и привлеченных организациях (фирме «Томсон-КСФ», Марсельском университете) по сложившейся кооперации, но значительно меньшими силами проводятся фундаментальные работы, в основном связанные с физикой низкотемпературной плазмы, физикой поверхности электродов, подбором новых материалов и рабочего тела, а также режимов работы ЭГЭ. Цель этих исследований — создание ТЭП так называемого второго и, в конечном итоге, третьего поколений с низкой рабочей температурой ($T_e \sim 1200$ К; $T_p \sim 600$ К) и высокими значениями КПД (до 20—30%) при плотности тока ~10 А/см². Французские специалисты надеются создать ТЭП второго поколения (КПД ~20%) к концу 1976 г.

Ведется поиск наиболее оптимальных путей применения таких ТЭП. В частности, по мнению французских специалистов, хорошие результаты обещает применение их в голове цикла тепловых станций с огневым (сжигание водорода) нагревом. Использование на ТЭС начальной ступени термоэмиссионного преобразования перед традиционным паротурбинным циклом, по оценкам французских специалистов, позволяет повысить электрическую мощность и общий КПД станции на 6—7% и довести КПД в рассматриваемом конкретном случае до 53%. Это может экономически оправдать применение на ТЭС дорогостоящего водородного топлива. Рассматривается также схема АЭС с ТЭП в качестве высокотемпературной надстройки к паротурбинному циклу, когда ТЭП встроены в парогенератор. В качестве источника тепла в этом случае изучаются высокотемпературные газоохладждаемые реакторы и реакторы с горючим в виде расплава урановых солей.

Однако в настоящее время можно говорить лишь о направлении поисков рационального использования ТЭП второго поколения, но еще нельзя судить ни о технических возможностях таких ТЭП, ни о термодинамическом и экономическом обосновании рассматриваемых схем.

Работы по ТЭП второго и третьего поколений идут

в основном по двум направлениям: 1) поиск новых материалов коллекторов либо методов обработки поверхности коллектора в целях получения работы выхода электронов в рабочих условиях порядка 1 эВ; 2) поиск путей снижения потерь на ионизацию плазмы.

Исследуется влияние на характеристики ТЭП как электроотрицательных добавок к цезию (кислорода, серы, селена), так и электроположительных (стронция, бария). В качестве материала коллектора изучаются такие соединения, как GaAs, GaP и т. п. Кроме того, исследуются тугоплавкие материалы (Nb, Mo, W, Ta), содержащие кислород либо в растворенном виде, либо в виде пленки окиси на поверхности. Фирма «Томсон-КСФ» исследует пористые вольфрамовые эмиттеры, импрегнированные соединениями бария. Рассматриваются покрытия, содержащие лантаноиды и бор. В Марсельском университете изучаются возможности

создания цезиевых импульсных ТЭП с добавками азота, который, как предполагается, позволит увеличить время распада плазмы.

Фундаментальные исследования по физике термоэмиссионного преобразования ведутся на хорошем научном уровне с применением современного экспериментального оборудования и приборов — квадрупольных масс-спектрометров, термоэмиссионных микроскопов, оже-спектрометров для исследования химического состава и состояния адсорбированных компонентов, дифрактометров медленных электронов для исследования структуры поверхности. Вакуум в рабочих камерах поддерживается на уровне 10^{-10} торр. Электронная аппаратура позволяет накапливать, сравнивать и воспроизводить на видеоустройстве получаемую информацию.

КУЗНЕЦОВ В. А.

АТОМИЗДАТ

Худ. ред. А. Т. Кирьянов Техн. ред. Н. А. Власова Корректор Е. Д. Рагулина

Сдано в набор 4.VI 1975 г. Подписано к печати 31.VII 1975 г. Т-10385. Тираж 2565

Зак. изд. 74254. Формат 84×108/16. Усл. печ. л. 8,4+0,21 вкл. Уч.-изд. л. 10,99. Цена 1 руб. Зак. тип. 0873

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7 «Искра революции»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли. Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9