

рик). Работы по проектированию будут проводиться на базе Ок-Риджской национальной лаборатории. В них также участвуют лаборатории физики плазмы Принстонского университета, Массачусетский технологический институт, фирма «Дженерал атомик». Руководителем работ назначен Д. Стейнер (Ок-Риджская национальная лаборатория). Основные требования к ЕТФ следующие: в установке должно быть осуществлено зажигание; длина рабочего импульса не менее 10 с; коэффициент использования 20—50%; нейтронный флюенс 6 (МВт·год)/м<sup>2</sup>; катушки тороидального магнитного поля должны быть сверхпроводящими. Проектирование ЕТФ уже начато и в течение 1980—1984 гг. на эти работы будет израсходовано около 40 млн. долл. Предполагается, что первые эксперименты на ЕТФ будут проведены в начале 1990 г.

Доклад Т. Варджена «Проектирование бандл-дивертера» явился своеобразным обзором разработок фирмы «Вестингауз электрик» по дивертерным системам. Эти работы начались в 1974 г. с проекта гибридного реактора-токамака для сжигания актинидов. В этом проекте и в следующем (TNS-4) разрабатывалась конструкция полоидального дивертера с коллекторными устройствами в виде пластин, смоченных жидким литием. Позднее фирма перешла к разработке бандл-дивертера, обладающего рядом инженерных преимуществ. Его использование делает возможным переход от конструкций экспериментальных установок к будущим промышленным реакторам. Фирмой выполнены обширные расчеты с целью выбора и оптимизации параметров магнитной системы бандл-дивертера с двумя основными и несколькими вспомогательными обмотками. Окончательный выбор коллекторных устройств еще не сделан; основное внимание уделяется системе водоохлаждаемых медных трубок, на которые с внешней стороны нанесен слой твердого геттера из цирконий-алюминиевого сплава. Альтернативными вариантами являются коллекторы с пленками или завесой из капель жидкого лития; а также твердые геттеры, охлаждаемые жидким металлом. В настоящее время фирма приступила к разработке проекта промышленного гибридного реактора-токамака с бандл-дивертером.

Во втором докладе Т. Варджена «Инженерные разработки сверхпроводящего магнита» были затронуты работы

по программе LCP (программа больших катушек), в которых участвует фирма «Вестингауз электрик», и проекты тороидальных магнитных систем для HFCTR (компактный термоядерный реактор с сильным полем) и СТНР (коммерческий гибридный реактор-токамак), а также рассмотрены вопросы, связанные с параметрическим анализом различных концепций конструкционного исполнения тороидальных катушек. По программе LCP фирма «Вестингауз электрик» разрабатывает тороидальную катушку на основе Nb<sub>3</sub>Sn с прокачкой жидкого гелия. В настоящее время фирмой разработан и проходит испытания (в виде коротких образцов) сверхпроводящий кабель на основе Nb<sub>3</sub>Sn. Особенность конструкции катушки заключается в использовании жесткой стальной плиты, имеющей отверстие для тороидальной камеры, витков полоидального поля и т. п., и желобков с D-образным контуром, в которые плотно укладывается токонесущая шина. Предполагается, что подобная конструкция катушки будет использована в реакторе СТНР. В результате анализа технико-экономических аспектов выбора схемы катушки оказалось, что для установок масштаба TNS экономически оправдано использование медных водоохлаждаемых катушек. Для демонстрационного и, тем более, коммерческого реактора наиболее выгодно использовать сверхпроводящие катушки на основе сплава ниобий — олово.

В докладах Д. Куммера «Системный анализ и экономические оценки эффективности термоядерных реакторов» («Макдоннел Дуглас») и И. Н. Святославского «Методология экономических оценок» (Висконсинский университет) сообщалось о ведущихся в США работах по стоимостным оценкам термоядерных реакторов-токамаков. В настоящее время в США разработаны 4 группы программ для таких оценок: COAST («Вестингауз электрик»), SCOPE («Дженерал атомик»), TOCOMO («Макдоннел Дуглас») и Parametric System studies (Аргонская национальная лаборатория). Оценки стоимости проекта ЕТФ Ок-Риджской национальной лаборатории делаются с помощью программы COAST. К настоящему времени в США централизованно проведена работа по установлению единых расценок на материалы и оборудование.

МАКСИМЕНКО Б. П.

## Ядерная энергетика и производство ядерного топлива в Японии

В июне 1979 г. в Токио состоялся советско-японский семинар по топливу для легководных реакторов АЭС, организованный Государственным Комитетом по использованию атомной энергии СССР и японским Атомным промышленным форумом. На семинаре были заслушаны доклады советских и японских специалистов о состоянии разработок, эксплуатационных характеристиках и тенденциях усовершенствования конструкций и производства твэлов и топливных сборок с целью повышения надежности, безопасности и экономичности реакторов АЭС в целом.

Япония достигла существенных успехов в развитии ядерной энергетики. Суммарная установленная мощность 21 блока 11 действующих АЭС, принадлежащих 7 японским электрическим компаниям, в настоящее время составляет приблизительно 15 000 МВт(эл.). К концу 1985 г. планируется эксплуатировать 33 блока 14 АЭС 8 электрических компаний суммарной установленной мощностью до 26 000 МВт(эл.). Намечено строить в основном крупные реакторные блоки, работающие в базовом режиме, электрической мощностью близкой к 1000 МВт. Проблемы маневрирования мощностью пока не затрагиваются. Основной задачей, стоящей перед японскими специалистами, является не только усовершенствование,

но и стандартизация узлов строящихся реакторов, уточненные характеристики которых представлены ниже.

|   | BWR                     | PWR                       |
|---|-------------------------|---------------------------|
| Тепловая мощность, МВт . . . . .                                  | 3293                    | 3423                      |
| Электрическая мощность, МВт . . . . .                             | 1100                    | 1160                      |
| Эквивалентный диаметр активной зоны, м . . . . .                  | 4,75                    | 3,37                      |
| Эффективная высота активной зоны, м . . . . .                     | 3,71                    | 3,66                      |
| Максимальная линейная мощность твэла, Вт/см . . . . .             | 440                     | 415                       |
| Неравномерность энерговыделения . . . . .                         | 1,19                    | 1,6                       |
| Максимальная температура топлива (UO <sub>2</sub> ), °C . . . . . | 1830                    | 1850                      |
| Число топливных сборок в активной зоне . . . . .                  | 764                     | 193                       |
| Конструкция сборки и число твэлов в ней . . . . .                 | Квадратная чехловая, 63 | Квадратная без чехла, 264 |
| Число дистанционирующих решеток . . . . .                         | 7                       | 9                         |

| Материал оболочек твэлов . . .  | Циркаллоу-2<br>рекристал-<br>лизованный   | Циркаллоу-4<br>рекристал-<br>лизованный   |
|---|---|---|
| Диаметр и толщина оболочек,<br>мм . . . . .   | 12,5; 0,86  | 9,5; 0,57   |
| Диаметр и высота шлифован-<br>ной таблетки топлива с лун-<br>ками и без центрального от-<br>верстия, мм . . . . . | 10,6; 15  | 8,19—   |
| Размер фасок на таблетках, мм   | 0,3   | 0,3   |
| Средняя плотность $UO_2$ , г/см <sup>3</sup>  | 10,4  | 10,4  |
| Содержание влаги в таблет-<br>ках, масс. % . . . . .  | ≤0,0008   | ≤0,0008   |
| Средний диаметральный зазор<br>оболочка—таблетка, мм . . . . .  | 0,17  | —   |
| Среда и внутреннее давление<br>в твэле, ата . . . . .   | Гелий, 1  | Гелий, 30   |
| Обработка оболочек твэлов . . . . .   | Химическое<br>травление на<br>10—20 мкм,<br>автоклави-<br>рование го-<br>товых твэлов | Механичес-<br>кая обработ-<br>ка и обез-<br>жиривание<br>(химическое<br>травление<br>для АТР) |
| Выгорание топлива,<br>(МВт·сут)/т . . . . .   | 27 500  |   |

Значительное внимание уделяется усовершенствованию разработанного в Японии энергетического канального реактора АТР с водой под давлением и тяжеловодным замедлителем.

Большое значение в развитии ядерной энергетики страны имеет основанный в 1956 г. Японский институт атомной энергии, связанный с научными отделениями практически всех японских фирм атомной промышленности и осуществляющий фундаментальные исследования в области реакторной физики, техники и топливной технологии (включая разработку высокотемпературных гелиевых реакторов для прямого восстановления железа из руд), в области ядерного синтеза и использования радионуклидов, в области безопасности и охраны окружающей среды и здоровья (отделение в г. Такаи). Развита также исследования в области радиационной химии и технологии (отделения в г. Такасаки и в г. Осака), в области топливных и конструкционных материалов (отделение в г. Оараи). Институт связан с исследовательскими учреждениями США, Франции, Великобритании, участвует в европейской программе изучения внутриреакторного поведения топлива при скачках мощности. В то же время научно-исследовательские группы частных фирм в достаточной степени оснащены экспериментальным оборудованием, необходимым для обеспечения исследованиями промышленных разработок. Например, фирма «Нишпон Фьюэл Девелопмент» (г. Оараи) имеет прекрасно оборудованную «горячую» лабораторию с бассейном выдержки, позволяющую манипулировать с полномасштабными облученными топливными сборками и проводить детальные исследования отработавшего топлива водоохлаждаемых реакторов. Следует также отметить наличие на станциях (например, первый блок АЭС «Михама» в г. Дуруга) оптико-телевизионного оборудования, позволяющего производить первичные исследования отработавших сборок непосредственно в бассейне выдержки с индикацией геометрических параметров, устанавливая наличие дефектов, осуществляя при необходимости накопление информации в машинной памяти.

Японией куплена лицензия на производство топлива для водо-водяных реакторов у фирмы «Вестингауз электрик корпорейшн» (США). Вместе с тем в процессе строительства завода и отработки технологии производства японскими специалистами осуществлены значительные усовершенствования технологических процессов, в особенности технологии контроля твэлов, что привело к резкому повышению качества продукции и снижению актив-

ности воды первого контура реакторов с  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  Ки/л. Так, число отказов твэлов японского производства по причине гидридной коррозии оболочек снизилось приблизительно на два порядка по сравнению с поставками фирмы «Вестингауз электрик корпорейшн» (1—10% выходов твэлов из строя). К числу усовершенствований твэлов относится повышение средней плотности таблеток из  $UO_2$  с 10,3 до 10,4 г/см<sup>3</sup> за счет увеличения температуры спекания в среде водорода до 1700 °С. Японскую технологию производства твэлов отличает также использование гелиево-дуговой сварки при герметизации твэлов (причем выход из строя соединений не наблюдается), отказ от автоклавирувания твэлов реакторов с водой под давлением (и даже от химического травления поверхностей), использование при необходимости сорбирующих влаги и газы геттеров, изготовляемых из пористых циркониевых материалов (прессованием порошка, стружки) и располагаемых во внутренних объемах твэлов, или же применение сушики снаряженного твэла с откачкой внутреннего объема перед герметизацией. Пока не установлено, что больше повлияло на улучшение работоспособности твэлов — повышение плотности таблеток, введение геттеров или сушики, так как эти усовершенствования были применены одновременно. Проводятся исследования возможности использования топливных таблеток без торцовых углублений при высоте, меньшей размера диаметра.

Твэлы собираются в квадратные сборки с помощью упругих дистанционных решеток, выполненных из листового инкаллоу-716 и прикрепленных к стержням, связывающим верхнюю и нижнюю решетки сборки. В дистанционирующих решетках твэлы зажаты плотно и не крепятся концами к несущим решеткам всей сборки. С целью более полного сжигания топлива предполагается использовать выгорающий поглотитель. Требования, предъявляемые к твэлам и топливным сборкам, в том числе с учетом аварийных ситуаций (нормы безопасности), соответствуют стандартам США (например, предельная температура циркониевой оболочки твэлов равна 1200 °С и т. п.).

В Японии развито промышленное производство высококачественных особо тонкостенных труб для оболочек твэлов и кожухов кассет (сборок). В частности, на трубопрокатном заводе в г. Осака (Амагасаки) фирмы «Сумитомо метал индастриз» в огромном ассортименте труб более, чем из 50 марок материала, поставляемых в соответствии с 15 стандартами различных стран, выпускаются особо тонкостенные бесшовные трубы из аустенитных и хромистых нержавеющей сталей, из циркаллоу-2 и циркаллоу-4. Там же выпускаются трубы для теплообменников, в том числе титановые, а также шестигранные цельнотянутые трубы из нержавеющей сталей для кожухов сборок реакторов на быстрых нейтронах. Этот завод, оснащенный новейшим оборудованием, позволяющим осуществлять производство по различным технологическим схемам в зависимости от материала и геометрии изделий, ежемесячно выпускает до 35 тыс. т различных труб (в штате завода 3 000 рабочих), и объем производства труб заданного сорта может регулироваться.

На заводе отработано производство труб из сплава  $Zr-1\% Nb$  при содержании кислорода 0,13 масс.%, характеристики которых удовлетворяют техническим условиям нашей страны. Производятся шестигранные трубы размером «под ключ» 110 мм из нержавеющей стали и существуют технические возможности производства труб размером «под ключ» порядка 140 мм и более. Производство труб из циркаллоу, объемом до 300 000 м/год осуществляется также на производственной установке Центральной исследовательской лаборатории фирмы «Сумитомо метал индастриз», расположенной в г. Амагасаки.

В технологическом процессе производства труб используются операции вакуумного отжига после холодной прокатки (или волочения), шлифовки наружной поверхности, обезжиривания, химического травления (на глубину до 10—20 мкм). Согласно спецификации допуск на наружный и внутренний диаметры циркониевых

из стальных труб диаметром до 15 мм составляет  $\pm 30$  мкм. Широко используется автоматический ультразвуковой и электромагнитный контроль размеров и дефектов труб соответственно.

Центральная исследовательская лаборатория фирмы «Сумитома метал индастриз» (объединившая ряд исследовательских групп, включая исследовательский центр в г. Хасаки), осуществляя помимо прикладных также фундаментальные исследования, играет важную роль в долгосрочном планировании развития и совершенствования технологии металлургических и трубных заводов этой фирмы для всего промышленного цикла, начиная с добычи руды, а также в обеспечении качества труб для активных зон ядерных реакторов и их экономичного производства. Лаборатория прекрасно оснащена современным оборудованием, что позволяет детально исследовать структурные состояния материалов на различных стадиях передела, длительные прочностные свойства на стандартных и трубчатых образцах (включая ползучесть, малоцикловую усталость и механизмы усталостного разрушения) и т. п. Одним из основных направлений работ является создание и изучение материалов для использования в водо-водяных, тепловых, натриевых быстрых и высокотемпературных газовых энергетических реакторах, в том числе сталей AISI-304, 316, 321 и циркониевых сплавов для оболочек твэлов, хромомолибденовых сталей 2.25Cr — 1Mo; 9Cr — 2Mo для парогенераторов, сплавов для высокотемпературных теплообменников ( $\sim 1000$  °C) типа 9Cr — 12Mo или 0,23C — 25Cr — 25Ni — Ti — Al.

В настоящее время разработан прочный коррозионно-стойкий сплав SZ (примерный состав 0,03C — 0,001Si — 0,28Mn — 0,004P — 0,002S — 27,36Cr — 5,14Mo — 5,04W — 0,0036B — 0,023Zr — остальное Ni) с пределом длительной прочности 2 кг/мм<sup>2</sup> при 1000 °C за время испытания 10 000 ч. Он предназначен для изготовления труб высокотемпературных гелиевых теплообменников. Минимальное количество хрома в этом сплаве определяется требованием удержания углерода в рабочих условиях с целью сохранения прочности материала. Исследуются также материалы для более низких рабочих температур, например: 0,22C — 1,3Mn — остальное Fe (для 450 °C); 0,13C — 1,2Mn — 0,2Cr — 0,3Mo — 0,4V — остальное Fe (для 500 °C); 0,06C — 9Cr — 2Mo — остальное Fe (для 600 °C).

При исследовании стали AISI-316 установлено, что обеспечение низкого содержания неметаллических включений требует ограничения содержания азота 0,1 масс.%, если нельзя ограничить содержание углерода 0,02 масс.%

Трубы из циркалоя с 1958 г. по технологии фирмы «Вестингауз электрик корпорейшн» также производит завод фирмы «Мицубиси метал корпорейшн».

Существующие в Японии технические возможности вполне достаточны для обеспечения внутренних потребностей в топливе для АЭС, а также для экспортных поставок при наличии устойчивого импорта обогащенного урана и сырья для производства конструкционных материалов.

ГОЛОВНИН И. С.

## Всесоюзное совещание по использованию автоматических систем управления на АЭС

Совещание проходило в пос. Полярные Зори в мае 1979 г. На нем впервые широко обсуждались проблемы автоматизации применительно к ядерной энергетике. Представленные специалистами более 20 организаций доклады были посвящены проектированию АСУ технологическими процессами для АЭС с корпусными и каналными реакторами; созданию, эксплуатации и совершенствованию автоматических систем централизованного контроля, регулирования и управления энергоблоками АЭС с РБМК; совершенствованию структуры управления энергоблоками АЭС и штатных схем на АЭС; автоматизации ядерных энергетических установок; применению ЭВМ для расчета, контроля и формирования полей энергораспределения и температуры в реакторах; применению ЭВМ для моделирования систем централизованного контроля и управления АЭС.

На совещании рассматривались частичная или полная автоматизация АЭС на различных организационно-управленческих уровнях. Использование вычислительной техники для главных целей управления основным элементом АЭС — реактора — стало необходимым. Вычислительные системы превращаются в неотъемлемый элемент оборудования АЭС, поэтому от них справедливо ожидать удовлетворения традиционным эксплуатационным требованиям надежности, безопасности, простоты обращения.

Задачи комплексной автоматизации были освещены в докладе А. В. Наумова (ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского). Сложилось два направления автоматизации: обеспечение оператора удобной и надежной информацией и замена (частичная или полная) труда оператора АЭС, переложение функций оператора на вычислительную машину. Исторически в первую очередь было обращено внимание на операции пуска агрегатов АЭС. Это потребовало появления нового класса устройств — устройств логического управления с дискретным способом действия. Возникли характерные задачи алгоритмизации дискретных процессов, создания специальной аппаратуры дискретного управ-

ления. В условиях возрастающей сложности АЭС повышаются требования к надежности устройств автоматики.

В докладе по проектированию АСУ технологическими процессами третьего и четвертого блоков Нововоронежской АЭС показано, что отечественные средства автоматизации находятся на достаточно высоком техническом уровне. Необходимо более широкое и всестороннее внедрение вычислительной техники, экономический эффект от которой должен определяться улучшением ядерно-физических и эксплуатационных характеристик реактора и АЭС. В докладе сотрудников ТЭП были рассмотрены состояние работ и перспективы развития АСУ технологическими процессами АЭС с ВВЭР. Концепция управления предусматривает смену режимов при эксплуатации, полное автоматическое управление, оптимальное распределение функций между техническими средствами и персоналом, автоматическое регулирование основных параметров, планомерный переход на последующие поколения ЭВМ.

Анализ развития отечественных АСУ технологическими процессами АЭС с РБМК был сделан в докладах, представленных специалистами ВНИИЭМ и ЛАЭС. В настоящее время широко внедряются штатные системы СКАЛА (Курская, Чернобыльская АЭС). Структура и основные параметры АСУ технологическими процессами систем СКАЛА были подробно освещены на примере системы для ЛАЭС. Были рассмотрены особенности ее работы в режиме «советчик оператора».

Специалисты Кольской АЭС представили доклад о структуре и развитии АСУ технологическими процессами, действующей на этой станции.

На совещании были широко представлены задачи управления, выполняемые АСУ. К ним относится задача предупреждения развития аварий на АЭС средствами управления мощностью энергоблока и технологическими регуляторами (ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского). Опыт, накопленный по таким системам на тепловых электростанциях, обобщен и применен в сотрудничестве со специали-