

матической сварки труб «встык» с трубной доской, разработку технологии изготовления и испытаний различных типов дистанционирующих решеток, на разработку и проверку технологии ремонта модульного парогенератора, включая отмычку труб от натрия. В докладе о термогидродинамических испытаниях сообщались результаты распределения скоростей и вибрации труб на полномасштабной прозрачной модели при испытаниях на воде. Цель исследований перспективных парогенераторов — анализ различных конструктивных схем, в частности с геликоидальными змеевиками, совершенствование технологии изготовления (особенно лазерной приварки труб к трубным доскам), более глубокое изучение конструкционных материалов как на базе перлитных сталей, так и высоконикелевых сплавов (главным образом, инкаллой-800) с различными легирующими присадками.

Большую часть программы по быстрым реакторам в Италии занимают работы по АЭС «Суперфеникс» (Франция). Одна из составных частей этой программы — проектные работы по совершенствованию АЭС «Суперфеникс».

## Опыт эксплуатации АЭС «Ловиса» (Финляндия)\*

На семинаре обсуждались различные аспекты работы АЭС с реакторами ВВЭР-440: опыт эксплуатации оборудования и систем АЭС, контроль за эксплуатацией со стороны властей, эксплуатационная надежность, способы неразрушающего контроля материалов и оборудования, радиационная безопасность. В советских докладах, как правило, излагались результаты анализа работы многих блоков.

Директор АЭС «Ловиса» А. Палмгрен дал обзор основных результатов работы станции с момента ее сдачи в промышленную эксплуатацию (с 09.05.77 по 31.05.79). Коэффициент нагрузки АЭС составил 77,7%. За время эксплуатации не было ситуаций, опасных для обслуживающего персонала или окружающей среды. За два года произошло только один сброс аварийной защиты при работе на мощности. Общее число отказов оборудования и ошибок персонала постоянно уменьшается. Проведенное в докладе сравнение с международной статистикой показывает, что на АЭС «Ловиса-1» достигнуты во всех отношениях хорошие результаты.

Подробный анализ работы главных циркуляционных насосов (ГЦН), парогенераторов, систем управления и защиты, автоматики, электропитания, перегрузочной машины, насосов и арматуры, циркуляционной системы содержался в докладе С. Мерисаари, Я. Куяла, Е. Миетинена и др.

ГЦН были изготовлены фирмой «Финатом». После устранения в процессе пуска недостатки в работе насосов (неравномерного потребления энергии двигателями, засорения уплотнений и т. п.) при промышленной эксплуатации не было ни одного случая остановки станции для проведения их внеплановых ревизий. Тем не менее при перегрузках (1978—1979 гг. в насосах обнаружены повреждения болтовых соединений тепловых экранов и крышки. После устранения обнаруженных дефектов,носящих, по мнению автора, характер «детской болезни», наладка ГЦН на АЭС «Ловиса-2» прошла без затруднений.

Горизонтальные парогенераторы советской конструкции работали практически безупречно. Коэффициенты теплоотдачи в процессе эксплуатации сохранялись постоянными, влажность пара при номинальных условиях не превышала 0,15%.

Не отмечено существенных помех при эксплуатации турбин. Наибольшие проблемы связаны с коррозией трубопроводов и оборудования в системах, охлаждаемых

Главный объект модернизации — парогенератор. В стадии эскизной разработки находится четырехмодульная конструкция парогенератора с прямыми трубками для «Суперфеникса II». Изготовлена, снабжена измерительными датчиками и поставлена для испытаний на стенде в Ренардье (Франция) модель прямотрубного парогенератора мощностью 45 МВт, состоящая из модуля испарителя и модуля пароперегревателя.

Советские специалисты ознакомились на фирме «Бреда-термомекканикс» с цехами, где изготавливаются компоненты французского реактора «Суперфеникс», а также итальянского опытного реактора РЕС, с отдельными лабораториями исследовательских центров CNEN в Бразимоне и Касачче и ходом строительства реактора РЕС, посетили управление фирмы NIRA и ознакомились с ее структурой и основными работами по ядерной энергетике. В таких исследовательских центрах, как Касачча, Бразимона, имеются лаборатории и стенды, где можно проводить исследования по парогенераторам натрий-вода.

ТИТОВ В. Ф.

морской водой. К лету 1979 г. заглушено 11 вышедших из строя трубок в конденсаторах. Все трубопроводы морской воды внутренним диаметром менее 100 мм и часть диаметром 200—300 мм пришлось заменить на пластмассовые или на трубопроводы с резиновым покрытием. Делается также вывод, что для трубок конденсаторов турбин и других теплообменников целесообразно применять титан.

Благоприятным является опыт работы основных генераторов. При испытаниях по сбросу нагрузки генераторы работали без замечаний. Несмотря на сложность и необщепринятое, по мнению докладчика, выполнение устройств возбуждения и регулирования напряжения, после нескольких попыток добились удовлетворения строгих требований, установленных в Финляндии. Генераторы выполнены со скользящими кольцами, что вызывает большие трудности в обслуживании щеточного аппарата. Однако благодаря правильному выбору давления в щетках и плотности тока удается на одних и тех же угольных щетках работать в течение всего промежутка времени между перегрузками реактора. В течение двух с половиной лет было только около 10 случаев вынужденного отключения генераторов от системы.

Ощутимые потери электроэнергии (около 1% от полной выработки) были связаны с дефектами арматуры, в основном протечками через сальниковые уплотнения и уплотнительные поверхности. В значительной степени эти дефекты удалось устранить путем вырыскивания уплотнительной массы в протекающий сальник через специально просверливаемое отверстие.

Общее состояние трубопроводов первого и второго контуров хорошее. Так, например, при проверке трубопроводов главных циркуляционных петель (двух в 1978 г. и двух в 1979 г.) не обнаружено ни одного образовавшегося или увеличившегося в процессе эксплуатации дефекта.

На АЭС «Ловиса» очень высокая степень автоматизации. Используется в основном техника западноевропейских фирм. Однако наиболее важные функции, например защита и регулирование реактора, осуществляются с помощью советского оборудования. Очень надежно работают системы защиты, блокировок и автоматизации. Хорошо зарекомендовала себя ЭВМ английского производства. За период с 01.01 по 31.10.77 г. время ее эксплуатации составило 98,4%, с 01.11.77 по 31.03.78 г. — 99,7%. Однако в набор программ расчетов пришлось внести около 300 изменений.

Надзор за безопасностью эксплуатации АЭС возложен на Институт радиационной безопасности (Т. Эурола) и основывается на законодательстве по использованию

\* По материалам советско-финского семинара «Обобщение опыта эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР-440», состоявшегося 20—28 августа 1979 г. в Эспо.

атомной энергии и других нормативных документах. В отличие от практики, принятой в СССР, почти все аспекты безопасности АЭС контролируются одним учреждением. Институт имеет пять отделов: медицинский, контроля, безопасности, исследований и административный. Деятельность по надзору включает в себя контроль за качеством эксплуатации, топливом и перевозками радиоактивных веществ, квалификацией персонала, ремонтами и модернизацией, отчетностью. Предусматриваются также плановые проверки и инспекции в аварийных условиях.

Большое место как в СССР, так и в Финляндии отводится сбору данных об эксплуатационной надежности, их статистической обработке и анализу. В Финляндии эта работа выполняется Государственным центром технических исследований. На АЭС «Ловиса» с этой целью используются бланки рабочих нарядов по ремонту. Для унификации сведений они заранее распечатаны, и требуется только ставить «крестик» в нужной графе. Бланки обрабатываются на ЭВМ, которая по заказу выдает информацию о неисправностях. За два года эксплуатации получены количественные данные о вероятностях отказа систем аварийного охлаждения активной зоны и промежуточного контура.

В докладах С. Хюрулайнена, Э. Леклина, В. В. Гребенникова и др. рассмотрены вопросы неразрушающего

контроля материалов и оборудования АЭС. Для контроля сварных швов петель первого контура использовался ультразвуковой метод. Указывалось, что расшифровка показаний дефектоскопа сильно осложняется отражениями, связанными с геометрией шва. На каждый найденный дефект фиксируется 100—1000 геометрических отражателей. Точность определения местоположения отражателей представляется весьма высокой ( $\pm 1$  мм). Положительный опыт получен финскими специалистами ( $\pm 1$  мм). Положительный опыт получен финскими специалистами также при использовании токового метода для контроля трубок конденсаторов турбин и парогенераторов.

Радиационная обстановка на АЭС обсуждалась в докладах Б. Вальстрема, А. Тамминена, Л. М. Лузановой и др. Отмечено, что персонал и население надежно защищены от радиоактивных излучений. Коллективная доза облучения персонала 100 бэр/год (1 бэр = 0,01 Дж/кг); в активной зоне нет негерметичных твэлов; количество выбрасываемого в окружающую среду трития около 150 Ки/год (1 Ки =  $3,700 \cdot 10^{10}$  Бк), а выбросы радиоактивных газов в атмосферу на четыре порядка ниже предельно допустимых значений.

Намечены темы для дальнейшего сотрудничества по проблемам ВВЭР.

ВОЗНЕСЕНСКИЙ В. А.

## Советско-французское совещание по проблемам удержания плазмы в токамаках

Совещание состоялось 12—14 декабря 1979 г. в Центре ядерных исследований в Фонтене-о-Роз близ Парижа. Оно проходило в рамках советско-французского сотрудничества по исследованиям в области УТС. Перед началом совещания советским специалистам была предоставлена возможность ознакомиться с исследованиями по физике плазмы в центрах ядерных исследований в Фонтене-о-Роз и Гренобле. В Гренобле исследования по УТС в настоящее время сосредоточены вокруг двух токамаков: «Петула» и «Вега». Обе установки имеют практически одинаковые параметры (большой радиус  $R = 72$  см, малый радиус плазменного шнура  $a \approx 15$  см, тороидальное поле  $B \approx 1,5$  Тл) и предназначены для исследования методов ВЧ-нагрева плазмы. Отличительная особенность установок «Петула» — вакуумная камера из алундовых секторов, соединенных сифонами из нержавеющей стали. Непроводящая камера позволила исследовать на этой установке метод ВЧ-нагрева с помощью магнитной накачки. Шесть внешних катушек возбуждали на обходе тора стоячую волну магнитного поля с частотой 150—200 кГц и амплитудой до 0,02 Тл. ВЧ-магнитное поле было однородно в малом сечении тора; по большому обходу тора укладывались три длины волны. Механизм передачи энергии от волны к ионам плазмы связан с затуханием Ландау, возникающим при совпадении фазовой скорости ВЧ-волны вдоль большого обхода тора с тепловой скоростью ионов. В экспериментах на «Петуле» эффективность данного метода нагрева очень мала: при мощности генератора 7 МВт плазме передается всего 20 кВт, что увеличивает температуру ионов на 75 эВ (начальная температура 150—200 эВ). Однако нагрев проходит без каких-либо неприятных побочных эффектов в полном согласии с теорией, предсказывающей рост эффективности до 10% в условиях работы крупных токамаков, приближающихся к реакторным параметрам. Тем не менее применение этого метода нагрева на крупных установках следующего поколения — типа JET — в настоящее время не рассматривается и интерес к методу за последнее время резко снизился. Это связано с осознанием трудностей введения ВЧ-мощности как при использовании диэлектрических

камер при внешнем размещении обмоток, так и в случае введения ВЧ-катушек внутрь камеры в условиях больших тепловых нагрузок и нейтронного облучения. Основная программа исследований на «Петуле» в настоящее время — нагрев на нижнегибридном резонансе (частота 1,25 ГГц, мощность генератора  $\sim 0,5$  МВт). В этом случае для ввода ВЧ-мощности используется пара сфазированных волноводов. При поглощении в плазме до 350 кВт удалось нагреть ионы на 80 эВ, а электроны на 200 эВ в центре плазменного шнура (начальная температура электронов 800—1000 эВ). Однако нагрев сопровождался увеличением плотности плазмы и поступлением примесей со стенок.

На установке «Вега» до ноября 1978 г. также исследовался нижнегибридный нагрев, но с вводом энергии петлевыми антеннами. В начале 1979 г. токамак «Вега» был переделан в стелларатор, и осенью этого года в стеллараторном режиме были проведены эксперименты по нижнегибридному нагреву (мощность до 200 кВт, частота 500 МГц). При работе с продольным током и ВЧ-нагревом в режиме стелларатора параметры плазмы оказались ниже, чем в режиме токамака. В бестоковом режиме при наличии только ВЧ-нагрева параметры плазмы были очень низкими: температура ионов и электронов 10 эВ, плотность  $1,2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Поэтому эксперименты в стеллараторном режиме были закончены в ноябре 1979 г., и установка «Вега» вновь переделана в токамак, где будет продолжено исследование нижнегибридного нагрева.

В Гренобле в течение длительного времени исследовался метод создания плазмы в открытых ловушках с помощью электронного циклотронного резонанса. После прекращения работ по открытым ловушкам полученный опыт был использован для создания ионных источников с генерацией плазмы с помощью СВЧ-мощности. Такой источник, не имеющий нити накала и электродов, обладает большой надежностью и длительным сроком службы (более 100 000 импульсов). В настоящее время на этой основе разрабатывается источник отрицательных ионов на энергию 300 кэВ с током 0,3 А с двойной перезарядкой на сверхзвуковой струе цезия. Получение отрицательных