

Конференция по опыту эксплуатации энергетических реакторов

В июне 1963 г. в Вене состоялась организованная МАГАТЭ конференция по обмену опытом эксплуатации энергетических реакторов. В конференции приняло участие 240 делегатов от 27 стран и шести международных организаций.

Было заслушано и обсуждено около 40 докладов. Обсуждались практически все типы реакторов (водо-водяные, кипящие и под давлением, графито-газовые, тяжеловодные, быстрые), но примерно половина всех докладов была посвящена графито-газовым реакторам. Было уделено внимание также вопросам подготовки обслуживающего персонала атомных станций. Некоторые доклады носили характер краткого обзора национальных программ и подведения итогов полученного опыта.

Советской делегацией, в состав которой входили Н. Н. Аристархов (Физико-энергетический институт) и А. Н. Новиков (Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова), было представлено два доклада — «Опыт эксплуатации реактора БР-5» (авторы А. И. Лейпунский, О. Д. Казачковский, М. С. Пивхасик, Н. Н. Аристархов, А. В. Карпов, Е. П. Ларин, И. А. Ефимов) и «Из опыта эксплуатации парогенераторов Первой атомной электростанции» (авторы Г. Н. Ушаков, В. Б. Лыткин, Л. А. Кочетков, В. В. Попов, Н. Т. Белинская, А. Ф. Соколов). Доклады были заслушаны с интересом и оживленно обсуждались. Особенно много вопросов вызвал доклад по опыту эксплуатации реактора БР-5, в котором была достигнута глубина выгорания двуокиси плутония, значительно превосходящая проектную (5,7 вес. % против проектного значения 2,0 вес. %). При достижении глубины выгорания 4,55 вес. % активная зона была частично перегружена в связи с постепенным повышением активности теплоносителя, вызванным выходом из строя около 20% твэлов. Причиной этого, как показал анализ продольных трещин поверхностных элементов в горячей лаборатории, являются распухание горючего и большое внутреннее давление.

По опыту эксплуатации быстрого реактора был представлен еще только один доклад «Атомная электростанция «Энрико Ферми». Автор доклада Р. Хартуэлл (США) сообщил результаты ядерных испытаний собственного реактора и технологического оборудования. Эти испытания проводятся уже около двух лет и выявили ряд крупных неполадок. В частности, помимо неисправности некоторых механизмов в корпусе реактора, при температурных испытаниях было обнаружено вспучивание графита внутреннего слоя, прилегающего к баку реактора, деформация твэлов, а также вибрационные разрушения трубок парогенераторов, приведшие к взаимодействию натрия с водой. Необходимость обеспечения более жесткой конструкции тепло-выделяющих сборок привела к вынужденному снижению электрической мощности станции до 60 Мвт против проектной 100 Мвт.

По водо-водяным реакторам (включая тяжеловодные) было представлено пять докладов (о реакторах «Янки атомик» и «Индиан-Пойнт» — США, BR-3 — Бельгия, «Агесте» — Швеция и NPD — Канада).

Электростанция «Янки атомик» выведена на мощность в ноябре 1960 г. и к февралю 1963 г. выработала свыше 2 млрд. *квт·ч* электроэнергии. Средняя ее стоимость за этот период составила 0,95 *цент/квт·ч* (средняя стоимость электроэнергии в районе расположения станции составляет около 0,8 *цент/квт·ч*).

Предполагается, что для второй и третьей активных зон реактора стоимость электроэнергии окажется ниже и составит 0,8—0,9 *цент/квт·ч*. При этом ожидается, что в период между перегрузками горючего коэффициент нагрузки станции удастся довести до ~0,9. Электрическая мощность станции увеличена дважды — в июне 1961 г. со 120 до 150 Мвт и после замены активной зоны в октябре 1962 г. до 170 Мвт. В первой и во второй активных зонах реактора проявились эффекты нестабильного поведения реактивности. Они происходят при резких изменениях мощности или сильных деформациях поля тепловыделения в активной зоне. Наблюдались как увеличения, так и уменьшения реактивности. Масштаб эффектов составлял до 0,5÷0,6% и проявлялся полностью в течение 1—2 суток. Анализ показал, что эти изменения реактивности не могут быть вызваны перераспределением Xe^{135} в активной зоне.

В ходе эксплуатации станций «Янки атомик», «Индиан-Пойнт» и реактора BR-3 выявились некоторые неполадки в работе основного и вспомогательного оборудования. Эти неполадки, как правило, объясняются повреждениями «нейдерного» оборудования — течи в предохранительных клапанах и вентиллях, нарушения в работе насосов, турбины, электрохозяйстве и т. д. Сами же реакторы работают достаточно надежно. Частые аварийные остановки в начальной стадии эксплуатации (на станции «Индиан-Пойнт», например, за первые шесть месяцев работы их было зафиксировано 187) объясняются главным образом недостатком опыта и сложностью системы блокировок.

Серьезной аварией на станции «Янки атомик» явилось повреждение стержней регулирования, выполненных из сплава Ag—In—Cd и покрытых никелем. После вскрытия крышки из-за большого содержания борной кислоты и кислорода в воде началось интенсивное разрушение никелевого покрытия. Некоторые поглотители потеряли до 80% никелевой поверхности. В результате растворения активного серебра сильно возросла активность воды и внутрикорпусных устройств. Ликвидация аварии заняла около месяца.

Электромагнитные приводы стержней регулирования хорошо зарекомендовали себя в работе. Твэлы реактора «Янки» со стальными покрытиями, проработавшие в реакторе около полутора лет, оказались в отличном состоянии.

В реакторах «Янки», «Индиан-Пойнт» и BR-3 для подавления реактивности в холодном состоянии используется ввод борной кислоты в теплоноситель. Использованная борная кислота не регенерируется для повторного ввода. Вывод бора осуществляется ионообменными фильтрами. Опытные вырски борной кислоты при работе реактора «Янки» на мощности сопровождались резким увеличением содержания кислорода в контуре.

Подробный и интересный доклад представила канадская делегация по тяжеловодному реактору NPD. Несмотря на необычный метод регулирования (уровнем замедлителя), установка обладает высокой эксплуатационной гибкостью — нагрузка может изменяться со скоростью до 20% в секунду. Конструкция реактора допускает его расхоложивание за 30 мин. Горизонтальное расположение каналов обеспечило возможность перегружать горючее «на ходу». Для проведения ремонтных работ в трубопроводах первого контура (который выполнен с минимальным коли-

чеством запорной арматуры) с успехом используется отсекание ремонтируемых участков трубопроводов ледяными пробками. Для образования пробок используется жидкий азот и твердый CO_2 .

По опыту кипящих реакторов было представлено четыре доклада, в которых анализируется работа атомных электростанций США «Дрезден», «Валлеситос», и EBWR, а также атомная электростанция ФРГ «Каль». К концу 1962 г. на этих станциях выработано свыше 2 млрд. *квт·ч* электроэнергии. По оценке авторов, станции продемонстрировали высокую надежность, простоту эксплуатации и отсутствие трудностей в проведении ремонтных работ. Несмотря на то что реактор «Дрезден» работал с поврежденными твэлами (поступающий в турбину пар содержал продукты деления), текущий планово-предупредительный ремонт турбины был выполнен практически обычными методами и в обычные сроки без какого-либо переоблучения обслуживающего персонала. Для того чтобы исключить необходимость работы в масках, были приняты меры, предотвращающие возможность высыхания поверхностей турбины до ее полной отмывки. При осмотре турбины никаких следов эрозии не было обнаружено. В настоящее время в США для такого типа станций выполнен проект турбогенератора мощностью 600 *Мвт*. Опыт эксплуатации показал, что в больших кипящих реакторах практически отсутствуют колебания поля тепловыделений, связанные с перераспределением Xe^{135} . При постоянной мощности реактора требуется, как правило, не более одного перемещения стержней регулирования в день.

В большом и подробном докладе «Обзор работ по ядерному перегреву» был обсужден опыт петлевых испытаний пароперегревательных элементов в Валлеситосском реакторе VBWR. Большая серия испытаний различных по конструкции твэлов показала, что используемая для покрытий нержавеющей сталь склонна к быстрому разрушению под воздействием коррозии под напряжением. Стали с увеличенным содержанием никеля имеют повышенную устойчивость. В докладе описана конструкция строящегося там же реактора EVESR, предназначенного для широкой серии испытаний пароперегревательных элементов. Реактор будет приспособлен для работы с поврежденными элементами.

По опыту эксплуатации графито-газовых реакторов было представлено наибольшее число докладов.

В настоящее время в Великобритании на четырех атомных электростанциях (в Колдер-Холле, Чапел-Кроссе, Брадуэлле и Берни) работают 12 реакторов, первые из которых (в Колдер-Холле) действуют почти семь лет. В ближайшие пять лет предполагается ввести в строй еще четырнадцать крупных энергетических реакторов общей электрической мощностью около 3000 *Мвт*. Ожидается, что для крупных английских

атомных станций стоимость электроэнергии составит 0,53 *пенс/квт·ч* (0,62 *цент/квт·ч*): капитальные затраты 0,3, первая загрузка 0,05, топливная составляющая 0,08 и эксплуатация 0,10 *пенс/квт·ч*. Расходы на регенерацию горючего и возврат плутония в этих цифрах не учитываются.

В настоящее время средний коэффициент нагрузки станций в Колдер-Холле и Чапел-Кроссе превышает 92%, несмотря на то что перегрузка горючего в этих реакторах требует их остановки. Перегрузку горючего на реакторах в Беркли и Брадуэлле будут производить на ходу. До глубины выгорания 2000 *Мвт·сутки/т* состояние твэлов с магнетитовыми покрытиями остается очень хорошим. При более глубоком выгорании сказывается распухание урана. В целях предупреждения деформации и придания большей жесткости твэлы новых реакторов снабжаются специальными бандажками. Считается, что реально достижимая глубина выгорания в этих реакторах может составить 3500—4500 *Мвт·сутки/т*.

Аварии на станциях в Колдер-Холле и Чапел-Кроссе связаны главным образом с выходом из строя вспомогательного оборудования. Редкие случаи повреждения твэлов вызывались, как правило, плохим качеством торцевой заварки покрытия или повреждением элементов при их загрузке в реактор. Состояние корпуса реактора в Колдер-Холле не вызывает опасений. Повышение температуры хладоломкости корпуса за двадцать лет эксплуатации не превысит 20°C .

Французские реакторы G-2 и G-3 работают с 1959 и 1960 гг., соответственно. В 1963 г. выведен на мощность реактор EDF-1. Бетонные корпуса французских реакторов находятся в хорошем состоянии. Несколько стгнивающих тросов из-за выявившейся коррозии заменены. Процент замененных тросов невелик. В реакторах G-2 и G-3 успешно осуществляется перегрузка на ходу. Несколько французских докладов посвящены специальным вопросам: созданию металлических и бетонных корпусов реакторов, организации перегрузки горючего, изучению эффекта Вигнера в графите и т. д.

Перегрузка горючего в реакторе итальянской атомной электростанции «Латина» с графито-газовым реактором электрической мощностью 200 *Мвт* производится на ходу. Перегрузочная машина испытана в рабочих условиях и показала хорошие результаты.

Конференция отразила накопленный опыт эксплуатации практически всех типов энергетических реакторов. Этот опыт свидетельствует о том, что по надежности и работоспособности атомные станции не уступают энергетическим установкам обычного типа. При использовании соответствующих мер защиты ремонтные работы, как неоднократно подчеркивалось на конференции, не вызывают особых затруднений.

А. Н. Новиков

Конференция по технологии новых ядерных материалов и неметаллического горючего

Конференция была организована Международным агентством по атомной энергии и проходила в июле 1963 г. в Праге. Основное содержание доложенных на конференции работ — вопросы, связанные с созданием ядерных материалов для использования их в условиях повышенных температур. В работе конференции приняло участие более 150 ученых из 23 стран и четы-

рех международных организаций; на 9 заседаниях было заслушано свыше 60 докладов (в том числе 15 докладов представили ученые Франции, 7 — Великобритании, 6 — СССР, 5 — Чехословакии, 3 — США и т. д.).

Значительная часть докладов была посвящена исследованиям в области технологии двуокиси урана.