

3 американско-советский семинар по парогенераторам для быстрых реакторов

Семинар по надежности и безопасной эксплуатации парогенераторов для быстрых реакторов-размножителей с натриевым охлаждением состоялся в октябре 1978 г. в Тампе (США). На нем было представлено 11 докладов советских и 12 — американских специалистов. Кроме того, каждая сторона информировала о выполнении совместных программ. Доклады и сообщения были разделены по тематике на четыре сессии: анализ конструкций; влияние рабочих условий на поведение материалов; теплообмен и теплогидравлика; течи и их обнаружение.

В докладах советских специалистов на первой сессии рассматривались результаты исследований, выполненных в обоснование проекта парогенератора для АЭС с БН-600, а также общие оценки перспективности двухстенных парогенераторов. В докладах американских специалистов анализировались состояние работ, выполненных фирмой «Атомик интернейшнл» по парогенератору для АЭС в Клинтч-Ривере (CRBR), в том числе приводились результаты стендовой обкатки опытного 30-МВт модуля. Расчеты одновременного воздействия сейсмике и разрыва теплообменных труб показали, что необходимо существенно увеличить толщину несущих элементов корпуса парогенератора CRBR по сравнению с первыми вариантами проекта. Проведены большие работы по технологии сварки, местной термообработки и контролю качества приварки труб к трубным доскам. Для реакторов, следующих за CRBR, рассматриваются три концепции: модернизированный вариант «хоккейной клюшки» фирмы «Атомик интернейшнл», двухстенный прямотрубный парогенератор фирмы «Вестингауз» в Тампе и змеевиковый геликоидальный парогенератор фирмы «Бабкок — Уилкоккс» (см. таблицу). Заключения о том, какая из конструкций оптимальная, нет, поэтому все они разрабатываются параллельно. Основной проблемой двухстенной конструкции продолжает оставаться индикация места течи и ее ремонт. Наиболее обоснованным является проект парогенератора «хоккейная клюшка» (PLBR), но и для него намечена обширная программа исследо-

ваний. Все перспективные варианты имеют модули большой мощности и многократную циркуляцию в испарителе. Наряду с циклом использования перегретого пара высокого давления ($t_{пе} \sim 460^\circ\text{C}$, $p \sim 16$ МПа) рассматривается низкотемпературный цикл насыщенного пара давлением 7,2 МПа. Материалом разрабатываемых конструкций является перлитная нестабилизированная сталь 2,25% Cr — 1% Mo.

На второй сессии рассматривались доклады советских специалистов о результатах металлографических и коррозионных исследований прямоточного парогенератора с S-образными змеевиками, демонтированного после 30 000 ч работы на БОР-60, о ресурсных испытаниях одно- и многотрубных моделей испарителя и пароперегревателя парогенератора БН-600, а также об исследовании констант обезуглероживания перлитной стали 2,25% Cr — 1% Mo и науглероживания стали типа 08X18H9.

Исследованию констант обезуглероживания стали 2,25% Cr — 1% Mo посвящен доклад американских специалистов, в котором описывается влияние термической обработки и чистоты металла на скорость обезуглероживания, а также на ее уменьшение со временем. Американские специалисты установили, что скорость коррозии этой стали для парогенераторов CRBR примерно одинакова для всех зон теплообмена, в том числе в зоне кризиса, и составляет ~ 20 мкм/год. При этом содержание натрия в воде повышалось до 12—30 мкг/л (норма 3 мкг/л). При исследовании фреттинга, износа и схватываемости труб в дистанционирующих решетках варьировались контактные нагрузки, длина и скорость скольжения труб, длина пути трения, температура натрия и периоды выдержек при отсутствии относительного смещения контактирующих элементов. Большой комплекс исследований фреттинга и износа позволил американским специалистам выбрать материал решетки для труб из стали 2,25% Cr — 1% Mo — инконель-718.

В докладах США на третьей сессии подробно рассмотрен теплообмен в парогенераторе типа «хоккейная

Характеристика парогенераторов будущих реакторов

Показатель	«Хоккейная клюшка»			С двухстенными трубками		С геликоидальными трубками	
	Прототипный модуль (MSG)	CRBR	PLBR	Вариант с МПЦ	Низкотемпературный цикл	Вариант с МПЦ	Низкотемпературный цикл
Тепловая мощность модуля, МВт	30	120 — испаритель 80 — перегреватель	288	292	482	435	322
Диаметр корпуса, м	0,46	1,37	1,83	2,34	2,29	4,29	4,22
Кратность циркуляции	1	2	6	—	6	—	4
Температура натрия на входе, °C	446	502	482	482	435	482	435
Давление генерируемого пара, МПа	17,6	10,68	15,69	15,69	7,2	15,69	7,2
Температура генерируемого пара, °C	384	485	457	457	t_s (287,8)	457	t_s (287,8)

ключка», а также для геликоидального трубного пучка и двухстенной трубы с анализом расчетных уравнений теплообмена и их корреляций по результатам уравнений работ на моделях, в частности в закритической области. Уточненные формулы обеспечивают проведение тепловых расчетов с погрешностью $\pm 5\%$. Тем не менее запасы поверхности теплообмена приняты в CRBR для испарителя 42% и для пароперегревателя 30%. Это объясняется преднамеренно консервативным подходом к созданию парогенераторов первых поколений.

В докладах советских специалистов рассмотрены концентратометрические и акустические методы обнаружения течей, опыт эксплуатации системы индикации течей на ВН-350 и расчетные оценки аварий при больших течах. Проанализирована конструкция «обратного» парогенератора на основе эксперимента с малой течью. Доклады США были посвящены исследованию малых течей и процессу их саморазвития, разработкам систем обнаружения течей. Сообщалось об американской программе исследований больших течей, состоя-

щей из двух этапов: первый — исследования для парогенератора CRBR, второй — изучение больших течей для проектов перспективных конструкций. Программа включает проведение экспериментов на моделях большого масштаба. Отмечена хорошая сходимость советских и американских результатов исследования гидродинамических и температурных эффектов при больших течах. В экспериментах с малыми течами получены отличающиеся по времени саморазвития течи данные.

Советские специалисты посетили машиностроительный завод фирмы «Вестингауз» в Тампе по производству парогенераторов и компрессоров объема для АЭС с LWR и ознакомились с изготовлением этого оборудования.

Присутствующие на семинаре специалисты отметили, что он носил конструктивный характер. Обсуждение технической информации имело взаимный интерес с точки зрения усовершенствования парогенераторов.

ТИТОВ В. Ф.

Совещание международной рабочей группы МАГАТЭ по высокотемпературным реакторам

Совещание состоялось в сентябре 1978 г. в Вене. В нем участвовали специалисты из 13 стран и представители организации OECD/NEA. Программа совещания состояла из трех разделов:

сообщения о программах развития высокотемпературных реакторов (НТР) в мире;

обсуждение технических докладов по НТР, их применению и роли в ядерной энергетике;

решение организационных вопросов, касающихся подготовки и распределения протоколов и отчетов и планирования совещаний на 1979—1980 гг.

В докладах и сообщениях специалистов была дана информация о действующих, строящихся и проектируемых АЭС с НТР. Высокотемпературный реактор AVR (ФРГ) уже более 4 лет эксплуатируется при температуре гелиевого теплоносителя 950 °С. Отмечается надежная работа шаровых твэлов разных конструктивных и технологических вариантов, в том числе и предназначенных для первой загрузки прототипного реактора ТНТН. Намечаемый объем экспериментальных работ на AVR планируется завершить к 1983 г. ТНТН мощностью 300 МВт (эл.), строительство которого завершается в Шмехаузене, предполагается ввести в строй в 1981 г. В настоящее время завершен монтаж основного оборудования, изготовлен комплект шаровых твэлов для первой загрузки, сооружается защитная оболочка АЭС. Другой прототипный высокотемпературный реактор АЭС «Форт-Сент-Врей» (США) мощностью 330 МВт (эл.) с твэлами блочного типа работает на мощности 70%. На нем установлены новые детекторы регистрации нейтронных потоков, температуры, давления. Выясняются причины возникновения флюктуаций температуры и давления гелия в различных зонах реактора, имевших место при работе на мощности 50—55%. В 1978 г. выявлены и устранены причины повышения влажности в контуре. Проверяются и подготавливаются различные системы и оборудование к выходу на проектную мощность.

Работы по НТР в некоторых экономически развитых странах в последние годы направлены на концент-

рацию усилий в области наиболее эффективного промышленного внедрения этого типа реактора. США по-прежнему рассматривают на первом этапе применение НТР для электроэнергетических целей. В отношении дальнейшего их внедрения фирма «Дженерал атомик» имеет поддержку Ассоциации по газоохлаждаемым реакторам (GCRA) и правительства. В настоящее время ведутся переговоры с электропроизводящими фирмами о заказах на серию АЭС с НТР мощностью по 900 и 1350 МВт (эл.), которые предполагается вводить в 1989—2000 гг. В отличие от АЭС «Форт-Сент-Врей» в этих проектах применен электрический привод основных газодувов. Топливный цикл реакторов окончательно не выбран, исследования ведутся в следующих основных направлениях: 93% $^{235}\text{U}/\text{Th}$ (HEU), 20% $^{235}\text{U}/\text{Th}$ (MEU) и низкообогащенный урановый цикл (LEU). Освоение и внедрение замкнутого топливного цикла, включая химическую переработку и рефабрикацию твэлов, предполагается завершить в США к 1995 г.

Некоторые страны (СССР, Польша, Франция, Япония) значительное внимание уделяют энерготехнологическому использованию НТР для химической, нефтяной, металлургической и других отраслей промышленности. Программа Японии направлена на применение высокопотенциальной тепловой энергии в сталелитейной и химической промышленности. Ближайшая цель Японии по газоохлаждаемым реакторам — создание сверхвысокотемпературного опытного реактора (VHTR) мощностью 50 МВт (тепл.) при температуре гелия на выходе 1000 °С. Проектные работы закончены, строительство предполагается осуществить в 1979—1985 гг. В настоящее время работают над обоснованием безопасности, проводят сейсмические исследования, реакторные испытания блочных твэлов и конструкционных материалов. В СССР исследуют возможности использования тепловой энергии НТР для энерготехнологических процессов, связанных с производством различных энергоносителей и химического сырья. Рассматриваются такие процессы, как термоэлектри-