

характера (объем информации о работе АЭС, своевременное уведомление об авариях, координация мер по ликвидации аварий, координация противоаварийного плана, компенсация за ущерб, длительность соглашения и пр.) должны приниматься на уровне двух- или многосторонних соглашений соседних государств. Такие соглашения уже есть. Так, ФРГ имеет двухсторонние соглашения с несколькими соседними странами о защите окружающей среды и населения, включая планы противоаварийных мероприятий. В рамках кооперации по атомной энергии Северных стран между Данией, Финляндией, Норвегией и Швецией заключена «Конвенция Северных стран по защите окружающей среды», включающая соответствующие требования, которые связаны со строительством АЭС в этих странах (Дания и Норвегия не имеют АЭС на своих территориях).

Выводы. Большинство выводов уже сделано при изложении материала. Отметим лишь некоторые существенные моменты.

Конференция выполнила свою задачу, подтвердив, что мировой опыт может быть истолкован однозначно: АЭС работают надежно и безопасно. Тенденция к повышению безопасности АЭС связана в основном не с какими-то внезапно появившимися непредвиденными обстоятельствами, заставляющими в корне пересмотреть установившиеся каноны, а с расширением масштабов и сферы применения атомной энергии, увеличением единичной мощности АЭС и приближением их к районам с высокой плотностью населения, а также непрерывно повышающимися требованиями к охране здоровья людей и чистоте окружающей среды.

Внимание специалистов и общественности западных стран к аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд-2» связано не с ее радиационными последствиями, которые невелики,

а с реальной, хотя и маловероятной, возможностью частичного оплавления твэлов при авариях. На этой и некоторых других станциях США имели место организационно-технические неполадки, не затронувшие по существу сути обеспечения безопасности АЭС — достаточности защитных и локализирующих систем устройств, важных для безопасности. Как уже упоминалось, значительного выброса радиоактивности и переоблучения не было. В то же время авария дала ценный опыт, который по возможности должен быть во всех отношениях тщательно изучен, особенно с точки зрения возможных последствий малых течей и мер по их предотвращению и ограничению. В частности, необходима стыковка и преемственность технических мероприятий на случай аварии с большими и малыми течами.

Что касается общей стратегии дальнейших усилий по повышению безопасности АЭС, то, на наш взгляд, она должна в целом, как и отмечалось на конференции, оставаться прежней. Позиция специалистов нашей страны по этому вопросу была изложена как на этой конференции, так и в других более ранних программных работах. При выполнении программы совершенствования безопасности АЭС следует обратить внимание как на оптимизацию уже разработанного оборудования (для более полной увязки повышающихся требований к безопасности с необходимой экономической эффективностью АЭС), так и на поиск более рациональных путей обеспечения безопасности, желательно с использованием естественных физических принципов, а также пассивных систем. Для решения этих задач следует совершенствовать экспериментальные установки, регламенты, методы расчета, в том числе количественно-вероятностные.

БУКРИНСКИЙ А. М., ПОЛЕТАЕВ Г. Н., СИДОРЕНКО В. А.

2-я Международная конференция по жидкометаллическим теплоносителям

В конференции, состоявшейся 20—24 апреля 1980 г. в Ричланде (США), участвовали более 350 специалистов из 12 стран. Большинство представленных на 22 заседаниях докладов (всего 175) относилось к технологии натриевого теплоносителя, значительно полнее по сравнению с 1-й конференцией были представлены результаты исследований по физической химии и технологии литья.

Опыт эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Реакторы EBR-II (США), «Рапсодия» (Франция), KNK II (ФРГ), YOYO (Япония) используются в качестве экспериментальной базы как для выполнения исследовательских программ по реакторному материаловедению, так и для изучения загрязнений в быстрых реакторах, отработки системы контроля примесей в натрии и устройств его очистки. EBR-II, являющийся основной базой для испытания твэлов и материалов, работает на мощности 71—76%. Радиоактивное загрязнение контура определяется ^{137}Cs (4,8 мКи/кг) и ^{113}Sn с максимальным отложением первого в холодных частях и в области паровой фазы. Для очистки от цезия в реакторе установлена ловушка с набивкой из стеклоглиноцера и с металлокерамическим фильтром (35 мкм) для предотвращения выноса частиц в контур. Модифицированы холодные ловушки: удалена фильтрующая набивка и увеличена зона отстойника.

KNK II достиг в марте 1979 г. мощности 20 МВт (эл.). Здесь имели место аварийные ситуации: течь масла в насосе второго контура, протечки в парогенераторе, нарушение герметичности в баках первого контура, блокировка поворотных пробок, утечка и выгорание около 500 л натрия из электрического нагревателя. Отмечен разрыв оболочки одного твэла испытательной зоны. Определенные трудности

вызывает перенос большого количества газа в натрии первого контура и связанные с этим флюктуации реактивности. Пузырьки газа образуются при падении потока натрия в вентилирующей трубе. Уменьшение расхода через вентилирующую трубу с 18 до 3,5 м³/ч существенно снизило амплитуду и примерно в 100 раз частоту пиков реактивности.

PFR (Великобритания) работает с высокой надежностью. Коэффициент готовности составляет 67% с момента достижения критичности и 86% между перегрузками. Активность теплоносителя низкая (мКи/г): 0,4—1,2 по ^{137}Cs , 10—30 по ^{54}Mn , 20—160 по ^{22}Na , 90 по Т. Произошла разгерметизация двух твэлов в экспериментальных сборках. Содержание водорода в натрии первого контура $(0,4—0,7) \cdot 10^{-6}$, активность углерода — 10^{-2} . Основные простои станции связаны с протечками парогенераторов.

YOYO с октября 1978 г. по февраль 1979 г. работал на мощности 50 МВт. Проведено два топливных цикла. С января 1980 г. эксплуатируется на мощности 75 МВт. В натрии содержится $(\times 10^{-6})$ кислорода — 10, углерода — 30, водорода — 5—10. Планируется переход на мощность 100 МВт (в 1983 г.) после модификации активной зоны.

«Рапсодия» используется для выполнения программ исследований загрязнений в быстрых реакторах.

Третий период эксплуатации «Феникса» проходит успешно. Время работы на мощности достигло 84%, среднее за весь период эксплуатации — 61,3% при коэффициенте нагрузки 56,4%. Нарботка электрической энергии составила на 31 декабря 1979 г. 6750820 МВт·ч. Достигнуто выгорание топлива 9,2%. В 1979 г. начата переработка топлива. В мае 1979 г. произошло повреждение оболочки твэла, локализованное за 72 ч.

Опыт пуска FFTF (США) подробно освещен в четырех докладах. После достижения критичности в феврале 1980 г. продолжаются плановые пусковые работы и ликвидация возникающих отклонений в работе оборудования. Отмечена повышенная вибрация одного из насосов первого контура и неплотности в сильфонах контрольного стержия бесконтактного индикатора уровня. Обнаружены неоднородность температуры и тепловые утечки. После устранения этих недостатков и осуществления запланированных работ реактор будет поэтапно выведен на мощность с достижением 100% (400 МВт) в декабре 1980 г. В комплексе с реактором осваиваются установки для хранения топлива, отмывки и ремонта оборудования, исследовательские горячие камеры. Содержание примесей в натриевом теплоносителе составляет ($\times 10^{-6}$): кислорода — 1,48, водорода — 0,14, углерода — 0,16, кальция — 0,02, железа — 12,9, хлора — 1,5, хрома — 0,37. Содержание остальных примесей — $(0,1-0,01) \cdot 10^{-6}$.

Коррозия и массоперенос, трение и износ материалов. Велика доля исследований массопереноса углерода между ферритными и аустенитными сталями в натрии. В докладах подробно рассмотрено влияние термической обработки материалов, их металлургической предистории, структуры, уровня содержания углерода и кислорода в натрии, температуры, гидродинамики натрия на процессы массопереноса. Линейная кинетика обезуглероживания стали 2,25 Cr — 1 Мо в натрии определяется скоростью растворения карбидных фаз в соответствии с реакцией первого порядка. В исследованиях по совместимости бинарных сплавов на основе ванадия установлены пороговые концентрации в натрии поглощенного кислорода, которые приводят к полному окрупчиванию их при комнатной температуре. Для V — Nb, V — Mo, V — Fe они составляют 0,28; 0,23 и 0,17 мас. %.

Анализ экспериментального материала по коррозии различных аустенитных сталей показывает, что влияние состава сталей на скорость их коррозии в натрии незначительно и в основном определяется содержанием никеля. Температурная зависимость скорости коррозии подчиняется закону Аррениуса с энергией активации ≈ 20000 кал/моль. Подтвержденные модели коррозии аустенитных сталей в натрии приводят к результатам, совпадающим с экспериментальными данными. Наиболее универсальной является модель Торлея. В то же время экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что скорость коррозии не является простой функцией содержания никеля. В преципитационно-упрочняющихся сплавах никель стабилизируется за счет образования обогащенных им интерметаллидов. Поверхность аустенитных сталей, контактирующих с натрием, приобретает ферритную структуру и через 10 тыс. ч выдержки в нем на 90—95% состоит из железа.

Существенное влияние на коррозию аустенитных сталей оказывает молибден, граничные концентрации которого, необходимые для образования устойчивой структуры, больше 2,5 мас. %. Высокохромистые ферритные стали (9 Cr — 1—2 Мо) позволяют значительно снизить интенсивность массопереноса углерода в биметаллических контурах в сравнении со сталью 2,25 Cr — 1 Мо. При повышенной концентрации кислорода в натрии ($> 10 \cdot 10^{-6}$) на поверхности стали 9 Cr — 1 Мо образуется хромит натрия, являющийся барьером для переноса углерода и азота.

Выполнен большой цикл исследований по совместимости с натрием молибденовых и ванадиевых покрытий на сплавах V — Mo, V — Nb — Mo, V — Nb — Cr, нержавеющей стали 316. Отмечена высокая устойчивость молибденовых покрытий, в том числе при термоциклических нагрузках с изменением температуры от 627 до 427°C и обратно.

Значительные работы проведены по коррозии и массопереносу на циркуляционных контурах, моделирующих реакторные системы и их отдельные компоненты. Отмечен эффект влияния переноса кремния, вымываемого натрием со свежих поверхностей аустенитных сталей, на увеличение гидравлических сопротивлений натриевых трактов (до 900% при $Re = 10^4-10^5$) и коэффициента теплопередачи (до 1/10 от исходного значения) за счет формирования слоя отложений его соединений с кислородом и натрием.

Исследования по коррозии аустенитных сталей в литии свидетельствуют о значительной зависимости ее скорости от режимов течения и перепада температуры в контуре.

Решение трибологических проблем снижения трения и износа материалов рассматривается одновременно как мера по предотвращению загрязнения теплоносителя, в особенности первого контура. Благоприятный эффект достигнут при использовании в трущихся парах материалов с алюминированными покрытиями. Установлена зависимость фрикционных свойств материалов от концентрации кислорода в натрии (для нержавеющей стали 316 — $8 \cdot 10^{-6}$, нержавеющей — $15 \cdot 10^{-6}$).

Приборы контроля теплофизических параметров и содержания примесей в натрии. Заслуживают внимания разработки и опыт эксплуатации датчиков внутриреакторного контроля температуры (типа зонда) и расхода натрия в трубопроводах с использованием принципа, основанного на эффекте Кармана, а также акустических приборов видения под слоем натрия. Значительный прогресс достигнут в разработке электрохимических ячеек с электролитом окись тория — 7—8%-ная окись иттрия для контроля кислорода в натрии. Ресурс отдельных экземпляров достигает нескольких тысяч часов. Положительно зарекомендовали себя ячейки с жидким сравнительным электродом (In/In_2O_3 , Sn/SnO_2 , Ga/Ga_2O_3), которые позволяют снизить термические напряжения электролитного элемента, обеспечивают надежный электрический контакт и минимизируют активационно-поляризационные явления. При 300°C ячейки со сравнительным электродом металл — окись металла сохраняют исходные характеристики при γ -облучении (^{60}Co) до скорости изменения дозы 5286 Р/ч.

Электрохимические ячейки широко используются как инструмент исследования физико-химических превращений примесей в натрии, например, для исследования кинетики растворения в натрии окиси и гидроокиси натрия. Основные трудности связаны с чувствительностью ячеек к термоударам, дрейфом сигнала и большим выходом их из строя в первоначальный период. Диффузионные ячейки для контроля активности углерода в натрии с воститным слоем на внутренней стороне диффузионной мембраны более двух лет успешно эксплуатируются в PFR. Лабораторный образец электрохимической ячейки для контроля активности углерода в натрии (электролит $Na_2CO_3 - Li_2CO_3$ с диффузионным барьером — мембраной из армо-железа) использовался при исследованиях термических превращений масла в натрии.

В системах контроля протечек парогенераторов натрия — вода ведущим направлением является разработка концентрационных систем для измерения водорода в натрии на основе никелевой мембраны в сочетании с ионно-разрядным насосом. Диапазон определения водорода составляет $(0,05-3) \cdot 10^{-6}$. Отмечается дрейф тока ионного насоса в начале эксплуатации. Адаптационный период такой системы составляет 6—9 мес, средний ресурс ионного насоса 4—5 лет. Разрабатываются датчики с повышенной жесткостью мембран для увеличения их ресурса до 30 лет. Исследуются возможности использования для детектирования протечек парогенераторов кислородных электрохимических ячеек в комплекте с диффузионными датчиками водорода.

Методы равновесных образцов для контроля активности углерода, азота, кислорода и водорода в натрии находят все большее распространение как в экспериментальных, так и промышленных установках. Сплавы Fe — Ni и Fe — Mn для контроля активности углерода и ванадиевые проволоки для контроля кислорода применяются, в частности, для спецификации натрия по указанным примесям при проведении коррозионных испытаний материалов.

Проектирование и испытания компонентов жидкометаллических контуров реакторов и экспериментальных установок. Главным направлением в проектировании и испытаниях компонентов жидкометаллических контуров установок с быстрыми реакторами является создание теплообменного оборудования и парогенераторов натрия — вода. Отмечается положительный опыт эксплуатации парогенераторов

EBR II, проработавших в течение 16 лет, в том числе 70 тыс. ч на мощности с 600 циклами ее повышения.

Разработаны принципы парогенератора для промышленных реакторов с планируемым ресурсом 40 лет. В 1982 г. предполагается изготовить модель одноступенного гелиоидального парогенератора мощностью 70 МВт. Испытания модели планируются на 1983 г. Предполагается также проведение детальных испытаний двухступенного прямотрубного парогенератора на моделях в масштабе 1/3 и 1/2. Проведены испытания модели парогенератора для установки в Клинч-Ривере (США) и модульного парогенератора разработки фирмы «Атомик интернэйшнл» в условиях протечек большого количества воды в натрий (до 13 кг в течение 10 с).

Значительное внимание на конференции было уделено проектированию и испытанию опытных образцов и прототипов оборудования натриевых контуров (электромагнитные насосы, температурные регуляторы, системы останки) и установок с литиевым теплоносителем.

Очистка оборудования, очистка натриевого теплоносителя. Накоплен большой опыт уничтожения значительных количеств щелочных металлов и изыскания средств, обеспечивающих отмычку и дезактивацию оборудования в промышленных масштабах. Очистке натрия от примесей посвящены как специальные доклады, так и разделы в докладах об опыте эксплуатации промышленных установок и экспериментальных стендов. Основные направления дальнейших

разработок связаны с оптимизацией имеющихся конструкций для повышения емкости ловушек по примесям и с разработками холодных и горячих ловушек специального назначения, например для очистки от гидрида натрия (в пусковом режиме), ^{54}Mn и ^{60}Co .

Влияние щелочных металлов на механические характеристики конструкционных материалов. В основной части докладов содержатся результаты исследований ползучести и усталостных характеристик ферритных 2,25 Cr — 1 Mo, 9 Cr — 1 Mo и аустенитных сталей серии 300 в натрии в зависимости от исходной термической обработки, нагрузок и карбюризаторного потенциала натрия. Отмечена недостаточная устойчивость к радиационной ползучести стали 2,25 Cr — 1 Mo при ее обезуглероживании. Установлено отсутствие влияния натрия на прочностные свойства стали 9 Cr — 1 Mo при пластичной радиационной ползучести. Усиленное распухание на третьей стадии ползучести, наблюдаемое у аустенитных сталей, связывается с комбинированным воздействием натрия и развитием межзеренной ползучести.

Конференция явилась важным событием, отражающим как успехи, достигнутые в промышленном освоении натрия в качестве теплоносителя быстрых реакторов, так и задачи, возникающие в связи с решением проблем оптимизации и повышения надежности энергетических установок. Ее труды будут изданы.

ЗАГОРУЛЬКО Ю. И.

4-е заседание международной Рабочей группы по ИНТОРУ

На заседание, состоявшееся 20—31 октября 1980 г. в Вене, каждая из сторон представила черновой вариант национального эскизного проекта ИНТОРа. Рабочие группы и Координационный совет совместно с Руководящим комитетом подтвердили основные параметры реактора и спецификацию для проектирования. Внесены дополнительные данные, которые расширили и уточнили таблицу параметров. Сделан шаг вперед по сравнению с 3-м (июньским) заседанием в выборе самосогласованного варианта характеристик потоков частиц и тепла, падающих на стенку реактора, диверторные пластины и придиверторную зону. Этот набор параметров служит в настоящее время основой для дальнейшего проектирования первой стенки и дивертора.

В физической группе обсуждались конфигурация полоидальной гофрировки тороидального магнитного поля, физика плазмы в пристеночной области и взаимодействие плазмы со стенкой, рабочий сценарий, а также дополнительные вопросы, выдвинутые на заседании: параметры плазмы и неустойчивость срыва. Сделан вывод, что уменьшение малого радиуса плазмы с 1,3 до 1,2 м, связанное с использованием магнитного полоидального дивертора с одним нулем, возможно лишь в случае поддержания тока плазмы на уровне 6,4 МА при магнитном поле на оси камеры 5,5 Тл и коэффициенте запаса устойчивости 2,1. Для создания диверторного канала во внутренней части тора имеются две возможности: применение дополнительных катушек для поджатия магнитного потока во внутренней части тора или использование конфигурации полоидального магнитного дивертора с двумя нулями. Были приведены новые экспериментальные данные о физике плазмы в пристеночной области, полученные на установках с полоидальным дивертором: ASDEX (ФРГ), PDX (США), Doublet III (США), T-12 (СССР). Поступила дополнительная информация с установок DTE (Великобритания), TFR (Франция) и T-10 (СССР). В результате обсуждения этих данных и характеристик систем с полоидальным дивертором предпочтение отдано дивертору с двумя нулями.

Отсутствие новой экспериментальной информации о неустойчивости срыва в токамаке послужило аргументом

для сохранения характеристик данного процесса, принятых на предыдущей сессии.

Выявлена значительная неопределенность роли гофрировки тороидального магнитного поля, которую она играет в переносе тепловых и быстрых ионов в плазме токамака. Учитывая экспериментальные результаты на PLT (США) и стеллараторе W VII (ФРГ) и теоретические выводы, группа заключила, что требования на значение гофрировки должны остаться неизменными. Однако высказаны рекомендации о возможности увеличения угла инжекции нейтрального пучка. Вновь рассмотрен рабочий сценарий и сделано заключение, что в настоящее время нет оснований для существенного его изменения.

В инженерной группе рассматривались эволюция основных различий представленных на сессию проектов и ключевые проблемы проекта, сформулированные на прошлой сессии. Руководящий комитет определил цель работы инженерной группы — иметь четыре национальных эскизных проекта к январю 1981 г., сходящихся по мере их обсуждения в один. На этом пути есть большие трудности. Группа достигла соглашения по наиболее важным проектным решениям, что должно облегчить работу по сведению четырех национальных проектов в один международный.

На сессии достигнуты следующие основные согласованные решения:

система тороидального магнитного поля должна состоять из 12 катушек внутренним размером около $10,5 \times 7,5$ м;

проект должен основываться на выполнимых для производства решениях;

для анализа циклических нагрузок на систему тороидального поля следует рассмотреть механику разрыва; динамический анализ требуется провести для конструкции токамака в целом;

сверхпроводник Nb_3Sn является наиболее приемлемым;

сильфоны или эквивалентные элементы с тонкой стенкой будут использоваться вместо электрических разъемов в вакуумной камере;