

Заседание Международной группы связи по МГД-генераторам

Очередное девятое заседание Международной группы связи по МГД-генераторам электроэнергетики состоялось 17—19 января 1973 г. в Париже в штаб-квартире Организации по экономической кооперации и развитию. В работе приняли участие постоянные представители 13 стран—участниц группы связи и приглашенные эксперты.

Повестка дня включала протокольные вопросы, информацию о прошедших за год национальных симпозиумах и обсуждение состояния дел и национальных программ по МГД-генераторам.

В докладе советской делегации отмечено, что в СССР по-прежнему активно развиваются все три основных направления в области МГД-генераторов: МГД-генераторы открытого цикла на продуктах сгорания, МГД-генераторы замкнутого цикла с ядерными (и термоядерными) источниками тепла и жидкометаллические МГД-генераторы. Приведены результаты технико-экономического анализа перспективности развития МГД-генераторов указанных направлений. Показано, что в СССР преимущественное развитие должны получить МГД-генераторы открытого цикла на продуктах сгорания нефти и газа, которые позволят получить к. п. д. станций до 50% (первое поколение) и 60% (второе поколение). МГД-станции экономически конкурентоспособны по сравнению с тепловыми при стоимости топлива более 8 руб./т. усл. топл. По капитальным затратам МГД-станции даже первого поколения не будут сильно отличаться от обычных тепловых станций, но позволят в полтора—два раза снизить уровень теплового загрязнения окружающей среды, что особенно существенно для Европейской части СССР.

Что касается МГД-генераторов замкнутого цикла, то в настоящее время физически и технологически создание самого неравновесного МГД-генератора с температурой газа 1500—2000°С возможно, но перспектива развития таких МГД-станций зависит от того, какой тип высокотемпературного реактора (ядерный или термоядерный) будет создан первым. Рассмотрение схемы неравновесного МГД-генератора с термоядерным реактором типа «Тета-пинча с лайнером», где тепло поглощается, например литиевым blanketом с испарением в канал МГД-генератора, показало перспективность такого преобразователя тепла в электричество. Несмотря на ряд стоящих при этом научных и технологических проблем, создание подобного эффективного

неравновесного МГД-генератора представляется реальным.

Жидкометаллические МГД-установки могут рассматриваться лишь в качестве надстройки к обычным тепловым станциям небольшой мощности. Это экономически целесообразно, если термический к. п. д. МГД-канала будет больше 6%, так как стоимость установленного киловатта энергии на ЖМГД очень низка из-за простоты установки.

В докладах американских специалистов дан обзор работ, проводимых по указанным трем направлениям в ряде крупных фирм и университетов США. Отмечено, что усилия фирмы «Авко-Эверетт» были направлены на демонстрацию работы равновесного МГД-генератора при приемлемом уровне мощности (установка «Марк-VI» генерировала мощность 560 *квт* в течение 5 ч), проведение технико-экономических расчетов, проектирование полномасштабной коммерческой МГД-станции и предварительные проработки опытно-промышленной станции на 50 *Мвт*. Помимо этого, проводились эксперименты на установке «Марк-VII» с высокой эффективностью преобразования и по другим программам.

Ряд фирм и университетов проводит работы по МГД-генераторам на продуктах сгорания угольной пыли. «Дженерал электрик» продолжает исследования по неравновесным МГД-генераторам. Получены к. п. д. преобразования энергии ~20%. Продолжаются экспериментальные и расчетно-теоретические работы и в других фирмах и университетах.

Активно проводятся работы по МГД-генераторам в Польше. В ряде стран (ФРГ, Италия) наблюдается спад активности в этой области в связи с переключением усилий на термоядерные исследования и разработки и по экономическим причинам.

В ФРГ выполнен технико-экономический анализ, показавший перспективность использования МГД-генераторов открытого цикла в качестве резерва при аварийных ситуациях на АЭС, однако работы в этом направлении не развертываются.

Обсуждались также вопросы организации VI Международной конференции по МГД-генераторам, которую решено провести в начале 1975 г. Место проведения конференции будет уточнено на 10 заседании. Оно состоится в феврале—марте 1974 г.

Ю. М. ВОЛКОВ

Советско-французский симпозиум по твэлам быстрых реакторов

В соответствии с Протоколом переговоров между ГКАЭ СССР и КАЭ Франции от 14 октября 1969 г. о дальнейшем сотрудничестве в области использования атомной энергии в мирных целях в Советском Союзе с 10 по 20 декабря 1972 г. проходил советско-французский симпозиум по твэлам быстрых реакторов. Во встрече приняли участие 12 членов французской делегации и 11 членов делегации и 26 экспертов с советской стороны. Кроме того, в течение всего визита французскую

делегацию сопровождал атташе по науке Посольства Франции в СССР г-н Ж. Шаппер.

С каждой стороны было заслушано по 13 докладов, а также состоялась интересная и полезная дискуссия по затронутым вопросам. Представленные доклады можно сгруппировать по следующим темам:

- 1) расчетные модели твэла и принципы работы;
- 2) свойства твэлов;
- 3) свойства конструкционных материалов твэлов;

- 4) результаты эксплуатации быстрых реакторов;
- 5) перспективные виды топлива — карбиды и карбонитриды;
- 6) производство твэлов.

Первая часть симпозиума проходила в Димитровграде (12—15 декабря), где были сделаны доклады по конструкции твэлов, разработке и принципам их расчета, свойствам твэлов, взаимодействию топлива с оболочкой при глубоких выгораниях, результатам эксплуатации штатных и экспериментальных твэлов в реакторах «Рапсодия» и БОР-60, а также по карбидному и карбонитридному видам топлива. Кроме того, заслушан французский доклад о производстве плутониевого топлива для реактора «Феникс».

Существенным отличием французских докладов является то, что они посвящены смешанному уран-плутониевому топливу.

Вторая часть симпозиума, состоявшаяся в Физико-энергетическом институте в Обнинске, была посвящена в основном материаловедческим проблемам, связанным с оболочечными материалами и шестигранными кожуховыми трубами. Рассматривалось влияние облучения в быстром реакторе на механические свойства, структуру и распухание сталей, оценивались свойства сталей для оболочек твэлов быстрых реакторов с натриевым охлаждением по результатам дореакторных и реакторных испытаний, обсуждались проблемы моделирования радиационной пористости на ускорителях. Кроме того, были представлены доклады по влиянию обработки стали на поведение шестигранных кожуховых труб в условиях нейтронного потока.

В результате обмена информацией по перечисленным проблемам обе стороны получили большую взаимную пользу. Интересно сравнить конструкции твэлов и кассет советских и французских быстрых реакторов. Как в кассете реактора «Рапсодия», так и в реакторе «Феникс» не используются вытеснители в пристеночных ячейках, что приводит к появлению разницы температур у пристеночных твэлов порядка 100°C . Применение вытеснителей позволяет снизить перепад температур по периметру пристеночных твэлов до $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$. Французскими специалистами отмечены интересные сообщения по массовому испытанию твэлов в реакторе БОР-60 до глубины выгорания 10% при температуре оболочки 700°C и по разработке советских сталей, легированных цинком, которые дают лучшие результаты по распуханию при дозе облучения $2,5 \cdot 10^{22}$ нейтр/см².

Считая перспективными исследования по карбидному и карбонитридному видам топлива, французские специалисты не видят целесообразности в использовании виброуплотненного окисного и металлического топлива. Ученые Франции так же, как и советские специалисты, подчеркнули необходимость дальнейшего исследования явления распухания с более детальным изучением влияния структуры и состояния сталей, температуры, спектра нейтронов и других факторов.

Советские специалисты считают интересной информацию по технологии производства таблеток окисного топлива из смешанной уран-плутониевой окиси. Французами отработана технология получения таблеток с твердым пластификатором, в качестве которого используются соли бегеновой кислоты. Применение твердого пластификатора дает по сравнению с водным лучшие результаты по пористости и геометрическим размерам таблеток. Интересна разработанная и применяемая французскими специалистами автоматическая печь для спекания таблеток из смешанного топлива. Печь имеет три зоны: зону сушки, зону удаления пластификатора

и зону спекания. Все технологические операции полностью автоматизированы, а процесс длится 28 ч. Ручные кратковременные операции допускаются только при ремонтных работах. Все производство таблеток из смешанного окисного топлива располагается на площади порядка 5000 м^2 ; производительность составляет $\sim 10\text{ т/год}$. Сообщено, что твэлы для первой загрузки реактора «Феникс» уже полностью изготовлены.

Использование смешанного окисного топлива приводит к более сильному по глубине и по периметру взаимодействию топлива с оболочкой, чем в случае применения сердечника только из окиси урана. Подробно, с привлечением большого фактического материала, освещен характер взаимодействия смешанного топлива с оболочкой, обсуждены возможные механизмы этого взаимодействия: окисление оболочки выделяющимся из топлива кислородом, образование на внутренней поверхности оболочки жидкой фазы эвтектических соединений окислов цезия, перенос хрома и железа из оболочки в топливо и т. д.

Советские специалисты отметили высокий уровень исследований, выполненных французскими учеными, а также хорошее оснащение горячих лабораторий Франции измерительной и другой техникой. Так, горячие лаборатории оборудованы не только первоклассными электронными микроскопами и микрорентгенспектральными анализаторами, но и ионными микроскопами, с помощью которых удается идентифицировать фазы в топливе и оболочке и определить наличие Cs, I, Te, Rb и других осколков деления, а также кислорода на поверхности стальной оболочки, вдоль зерен при межкристаллитной коррозии оболочки и в топливе. Все это позволяет получить более полную информацию об облученном образце, что очень важно, так как эксперименты по облучению дороги и занимают много времени.

Исследования развития дефектов твэлов на реакторе «Рапсодия» показывают, что оно идет медленно до тех пор, пока натрий не проникает под оболочку. После этого начинается взаимодействие натрия с продуктами деления, особенно сильное в твэле с большой глубиной выгорания смешанного топлива. Сообщение об этом явлении вызвало оживленную дискуссию.

Результаты исследований структурных изменений в топливе, образования центрального отверстия и сопоставления расчетов с экспериментами не расходятся с данными советских специалистов.

Французские специалисты получили полезную информацию по конструкционным материалам кассет и отметили, что разработка в Советском Союзе стали Х16Н15МЗВ — большое достижение советских ученых в выборе оболочечного материала, обеспечивающего надежную работоспособность твэлов быстрых реакторов.

Советских и французских исследователей объединяет одинаковый подход к выбору обработки оболочечного материала для твэлов — стали Х16Н15МЗВ и стали 316 в закаленном состоянии, что отличается от подхода английских и американских ученых, выбравших для оболочек сталь типа 316 в состоянии холодной деформации.

Приведены предварительные результаты по исследованию твэлов со смешанным уран-плутониевым карбидным топливом, облученных в реакторе «Рапсодия». Сообщены программы исследования карбидного и нитридного горючего в реакторах «Рапсодия» и БОР-60. Отмечен одинаковый подход к композициям перспективных видов горючего и конструкции твэлов. Оптимальной признана конструкция твэлов с натриевой прослойкой.

Для изготовления шестигранных кожуховых труб во Франции применяется сталь 316 L в холоднодеформированном состоянии. По мнению французских специалистов, такая сталь подвержена меньшему распуханию, чем закаленная, и тем более после термомеханической обработки. В Советском Союзе для шестигранных кожуховых труб быстрых реакторов используется сталь ОХ18Н10Т, обработанная термомеханически (20%-ная холодная деформация с последующим отжигом в течение 1 ч).

Подводя итог шестидневному семинару, главы делегаций отметили, что он будет способствовать дальнейшему прогрессу в области разработок быстрых реакторов. Отмечена эффективность сотрудничества в виде периодических встреч типа симпозиумов, а также целесообразность обмена стажерами для работы на реакторах «Рапсодия», БОР-60, в исследовательских лабораториях и «горячих» камерах.

Л. П. ЗАВЯЛЬСКИЙ

Советско-шведский симпозиум по безопасности АЭС

5—7 марта с. г. в научно-исследовательском центре в Студсвика (Швеция) состоялся советско-шведский симпозиум по техническим проблемам безопасности атомных электростанций. В ходе симпозиума обсуждены многие актуальные вопросы обеспечения безопасной эксплуатации и размещения АЭС.

Один из шведских и один советский доклад были посвящены обсуждению степени опасности близости АЭС для окружающего населения. В докладе, представленном группой сотрудников ИАЭ им. И. В. Курчатова, рассматривается потенциальная опасность АЭС с точки зрения возможных последствий большой аварии на примере водо-водяного реактора тепловой мощностью 1400 Мвт. Показано, что выброс всей активности, содержащейся в первичном теплоносителе, даже при эксплуатации реактора с большим числом негерметичных твэлов, не представляет опасности для окружающего населения. Основные усилия следует направлять на создание эффективных систем аварийного охлаждения, чтобы при возможных авариях реакторной установки предотвратить развитие повреждений твэлов в активной зоне.

В зависимости от эффективности систем аварийного охлаждения и расположения АЭС относительно крупных населенных массивов следует выбирать конструктивные формы систем локализации выделяющейся радиоактивности.

В докладе С. Бергстрема обсуждается степень риска, связанного с размещением АЭС в черте большого города. При этом рассматривается опасность АЭС при нормальной эксплуатации, возможных повторяемых авариях и очень больших (но и очень маловероятных) авариях. Опасность оценивается на основании анализа соматических и социально-медицинских эффектов. Подчеркивается, что надежность оборудования, требуемая (и реализуемая) для обеспечения экономически эффективной эксплуатации АЭС, по мнению автора, превышает надежность, необходимую для доказательства безопасности АЭС. Наибольшую неопределенность в оценке опасности АЭС представляет проблема правильной оценки больших аварий, в частности их вероятности. Это ограничивает получение однозначных ответов о безопасности размещения АЭС в городах.

В трех докладах обсуждались способы обеспечения безопасности АЭС. А. М. Букринский рассматривает мероприятия, предусматриваемые при проектировании АЭС в Советском Союзе для предотвращения радиационной опасности в случае аварий. Подчеркивается, что прежде всего необходимо высокое качество оборудования, широкий периодический и непрерывный контроль его состояния в ходе эксплуатации. Основные усилия

должны направляться на предотвращение аварии, а лишь затем на ограничение ее масштаба и локализацию последствий.

В докладе И. Тирена рассматривается подход к безопасности разрабатываемых в Швеции кипящих корпусных легководных реакторов. Он характеризуется созданием многократных барьеров на возможном пути радиоактивных продуктов из топлива в окружающую местность, надежных систем защиты реактора и надежных систем их аварийного охлаждения.

В докладе, представленном группой сотрудников Всесоюзного теплотехнического института им. Ф. Э. Дзержинского, описываются конструктивные решения и анализируется эффективность системы безопасности АЭС с реактором водо-водяного типа, в которой предусматривается организованный выброс малоактивной части первичного теплоносителя в окружающую среду и удержание высокоактивных продуктов, которые могут выйти из активной зоны на последующих стадиях аварии.

Использованию вероятностного подхода к оценке потенциальной опасности АЭС и анализу аварий были посвящены два из представленных докладов: А. И. Клемина и Е. Ф. Полякова (СССР) и Пер Линдера (Швеция). Уже сейчас вероятностный метод позволяет при проектировании выбирать наиболее приемлемый вариант среди различных возможных структурных решений систем нормальной эксплуатации, защиты и локализации в результате сравнительного анализа безопасности.

В шведском докладе на основании вероятностного подхода показано, что при современной структуре систем безопасности наибольшая вероятность самой опасной аварии — расплавления активной зоны связана с катастрофическим разрывом корпуса. Вероятность такой катастрофы оценивается как 10^{-6} год⁻¹.

Конкретные системы аварийного охлаждения активной зоны и поведение реактора во время аварии с разрывом контура обсуждались в докладах С. Эриксона (Студсвик), В. П. Стекольников и др. (представленным Г. И. Бирюковым). К этим докладам по тематике примыкает доклад Ю. В. Ржевникова и др. об оценке опасных механических воздействий при авариях с разуплотнением оборудования на АЭС.

В двух советских докладах обсуждались результаты экспериментального исследования истечения горячей воды через отверстия и трубки в диапазоне давлений 20—221 бар (В. Д. Келлер, Б. К. Мальцев и Д. А. Хлесткин) и переноса и осаждения негазообразных продуктов деления при моделировании течи первого контура водо-водяного реактора (В. И. Павленко).