

Конференции и совещания

IX Мировая энергетическая конференция (МИРЭК IX)

Конференция проходила 23—27 сентября в Детройте (США). В ее работе участвовали более 4300 делегатов от 80 стран и практически всех международных организаций, связанных с энергетикой (Совета Экономической Взаимопомощи, Европейской экономической Комиссии ООН, Международного института прикладного системного анализа, МАГАТЭ, Европейского экономического сообщества и др.). Советскую делегацию возглавлял министр энергетики и электрификации П. С. Непорожний. Эта конференция была юбилейной: в 1974 г. исполнилось 50 лет организации МИРЭК. На открытии конференции с изложением Мировой комплексной энергетической программы «Проект интерзависимости» выступил президент США Дж. Форд.

Следует отметить, что особенностью конференции было то, что она состоялась сразу после разразившегося в западных странах энергетического кризиса 1973—1974 гг., коснувшегося международных отношений и серьезно сказавшегося на экономике ряда стран. Поэтому конференция вышла за рамки простого рассмотрения и обсуждения научных и прикладных задач в области энергетики, энергетических ресурсов и их использования. В дискуссиях, докладах и выступлениях часто затрагивались вопросы философии, политики, социологии, психологии, международного сотрудничества и др.

Девиз конференции — «Экономика и среда обитания в свете будущих потребностей в энергии» — также нашел отражение как в тематике 229 представленных докладов, так и в характере обсуждения вопросов, дискуссий и в классификации докладов. Все доклады были сгруппированы по следующим отделениям и секциям*:

I отделение. — Население и энергетические ресурсы.

Секция 1. Рост и распределение населения (5).

Секция 2. Энергетические ресурсы и их использование (33).

Секция 3. Распределение ресурсов (14).

II отделение. — Среда обитания и поставка энергии.

Секция 1. Качество воздушной среды (12).

Секция 2. Качество водной среды (12).

Секция 3. Использование земли (5).

Секция 4. Уровень шума (4).

Секция 5. Эстетика (2).

Секция 6. Воздействие среды обитания на поставку энергии (20).

III отделение. — Восстановление энергетических ресурсов.

Секция 1. Прогресс в технологии восстановления энергетических ресурсов (20).

Секция 2. Воздействие технологии восстановления ресурсов на среду обитания (8).

IV отделение. — Преобразование энергии.

Секция 1. Прогресс в технологии преобразования энергии (22).

Секция 2. Воздействие преобразования энергии на среду обитания (24).

V отделение. — Транспорт энергии.

Секция 1. Прогресс в технологии транспорта энергии (18).

Секция 2. Воздействие технологии транспорта энергии на среду обитания (3).

VI отделение. — Использование энергии.

Секция 1. Прогресс в использовании энергии (24).

Секция 2. Воздействие использования энергии на среду обитания (6).

Атомной тематике было посвящено 26 докладов, причем 23 из них — реакторной электроэнергетике, 3 — применению реакторного тепла для опреснения морской воды, возможной роли атомной энергии в использовании ресурсов океана и термоядерной энергии. Большая часть докладов по ядерной энергетике (ЯЭ) была отнесена к теме «Преобразование энергии».

Практически во всех докладах, касающихся планов и прогнозов развития энергетики в разных странах, определенная роль отводилась ЯЭ. При рассмотрении ядерно-энергетической тематики основное внимание уделяется макровопросам ядерно-энергетического производства: масштабам развития и прогнозной структуре, топливной проблеме и топливному циклу ЯЭ. В отличие от предыдущих конференций почти не описывались типы реакторов и АЭС, реакторная техника и технология. Главное внимание уделялось не столько собственно АЭС как электрогенерирующему средству, сколько факторам и условиям, обеспечивающим функционирование АЭС (ресурсам и добыче урана, изготовлению твэлов) или сопровождающим его (захоронению радиоактивных отходов, безопасности АЭС, воздействию на среду обитания и связи с ней ЯЭ). Эти вопросы также рассматривались применительно ко всей ядерно-энергетической системе, а не к отдельным АЭС. Вообще следует подчеркнуть, что системный подход при рассмотрении энергетических проблем был характерен для данной конференции.

Доклады по ядерно-энергетической тематике условно можно сгруппировать следующим образом:

1. Масштабы и прогнозы развития ЯЭ.

2. Роль быстрых реакторов и структуры ЯЭ в будущем развитии ЯЭ, альтернативы структуры системы АЭС.

* В скобках указано число представленных докладов.



Детройт. На переднем плане Кобо-холл — спортивно-выставочный комплекс, в котором работала Мировая энергетическая конференция.

3. Опыт сооружения и эксплуатации, новые типы и проекты АЭС.

4. Вопросы внешнего топливного цикла ЯЭ.

5. ЯЭ и среда обитания.

Роли ЯЭ в будущей поставке энергии в мире (как правило, до 2000 г.) посвящен ряд как национальных докладов, так и докладов международных организаций. Разными авторами предсказываются масштабы развития ядерно-энергетического производства в мире с разделением по укрупненным географическим зонам: Европа, Северная Америка, Тихоокеанская зона, Центральная и Южная Америка, Азия и Дальний Восток и Новая Зеландия, Африка и Средний Восток, страны с централизованно планируемой экономикой. Приводятся также данные по отдельным странам.

Подчеркивается, что вызванный энергетическим кризисом 1973 г. значительный рост мировых цен на сырую нефть с 21,2 — 23,8 до ~ 133 долл./т привел к увеличению экономической конкурентоспособности АЭС. Это выразилось в экономической допустимости использования более дорогого урана (22 долл./кг U_3O_8), значительном снижении экономически допустимой единичной мощности блоков АЭС и, следовательно, расширении рынка спроса на АЭС, а также в большей заинтересованности в сооружении крупных АЭС. Все это, как ожидается, приведет к интенсификации развития ЯЭ и ее значительному вкладу в выработку электроэнергии на уровне 2000 г. В целом в мире к 2000 г. доля АЭС в суммарных электрогенерирующих мощностях составит, по оценкам разных авторов, 50 — 83%. Последняя цифра, соответствующая мощности 5300 млн. кВт, является предельной и, по-видимому, завышенной.

Более реальной считается мощность 2700—3000 млн. кВт.

Почти все авторы отметили роль быстрых реакторов (БР) для экономии урановых ресурсов в будущем. Развитие БР по-прежнему рассматривается как генеральное направление развития ЯЭ. Однако пока их недостаточная техническая готовность для широкого коммерческого использования определяет по прогнозам относительно небольшое (не более 30%) место БР в структуре ЯЭ, по крайней мере до конца столетия. Другими словами, до конца столетия ЯЭ останется преимущественно «тепловой», и сколько-нибудь значительной экономии урана от применения быстрых реакторов-размножителей (БРР) до 2000 г. не ожидается. К тому же стоимость сооружения таких реакторов в настоящее время представляется просто пугающей. Например, сооружение быстрого жидкометаллического реактора LMFBR мощностью 350 Мвт (эл.) в Ок-Ридже (США) в настоящее время оценивается в 1,736 млрд. долл.

В связи с этим подчеркивается, что экономическая конкурентоспособность АЭС с реакторами LWR сохранится даже при увеличении цен на уран по крайней мере в два, а возможно и в три-четыре раза. Поэтому нет особых опасений в длительной жизнеспособности тепловых реакторов LWR, даже если их рассматривать вне связи с существованием БРР. Если же эффективные БРР будут введены в ядерно-энергетическую систему в ближайшие 10 — 20 лет, то реакторы LWR смогут нарабатывать для них плутоний при потреблении урана в несколько миллионов тонн. Это не составляет значительной части оцениваемых мировых ресурсов урана.

Считается, что реакторы LWR можно перевести в режим конвертирования. Например, уменьшение глубины выгорания в них с 34 000 до 15 000 *Мвт-сутки/т* U увеличивает выход плутония на 50%.

Исключения составляют доклады специалистов Франции и Канады. Первые считают, что до конца века промышленное использование БРР будет сдерживаться недостатком плутония и довольно большим временем удвоения в первых БРР (15 лет на окисном горючем). Тем не менее время удвоения 10—15 лет принимается достаточным, и нет необходимости переходить к другому виду теплоносителя (газовый).

Канадские специалисты рассматривают тяжеловодные реакторы-конвертеры типа CANDU как альтернативу БРР. Хотя в ЯЭ других стран признается важная роль БРР, авторы считают, что весьма значительные запасы урана и тория в земле и океане ($2,5 \cdot 10^{12}$ и $8 \cdot 10^{12}$ *т* соответственно) в принципе позволят удовлетворить ожидаемые потребности в энергии на сотни лет за счет тепловых реакторов.

Следует отметить несколько возросший интерес к высокотемпературным реакторам HTR, хотя их доля в структуре ЯЭ на уровне 1990 г. ожидается не выше 3%, а на уровне 2000 г. — не выше 7%.

Отмечается значительное повышение удельной стоимости АЭС. Например, в США средняя удельная стоимость АЭС с реакторами LWR увеличилась со 134 *долл./кВт* в 1967 г. до 397 *долл./кВт* в 1973 г. Такое повышение отражает больший реализм в оценке стоимости, а также вызвано рядом причин: эскалацией цен на оборудование и материалы, увеличением расходов на строительную рабочую силу, инфляцией, изменением процента на капитал во время строительства и задержкой последнего до нескольких лет, увеличением требований по безопасности АЭС и их надежности, усложнением и удорожанием процедуры лицензирования и т. д.

Время строительства АЭС в США увеличилось до 8—9 лет. Предполагается, что и в дальнейшем стоимость АЭС будет возрастать, главным образом из-за дополнительных требований по безопасности. При этом считается, что точно определить стоимость АЭС невозможно, поскольку от времени принятия решения о ее строительстве до пуска в коммерческую эксплуатацию проходит 9—10 лет. За этот период существенно изменяются экономические условия, общественное мнение, позиции руководящих организаций и правительства, стоимость рабочей силы и ее производительность.

Сейчас в США единичная мощность реакторов LWR ограничена 1300 *Мвт*, хотя существующая технология уже позволяет увеличить мощность до 2000 *Мвт*. Пока неясно, какие факторы будут ограничивать дальнейший рост единичных мощностей (значительно больше 2000 *Мвт*). Считается, что экономия в удельной стоимости за счет увеличения единичной мощности будет частично потеряна вследствие повышения стоимости строительства, вызванного отмеченными причинами.

По мнению специалистов США, для двухкомпонентной ядерно-энергетической системы (LWR + FBR) не потребуются какие-либо новые типы реакторов, поскольку она отвечает требованиям, предъявляемым к ЯЭ, и обладает значительным техническим и экономическим потенциалами.

Новые проекты АЭС, представленные на МИРЭК IX, характеризуются новыми способами сооружения (плавающие и подземные АЭС). Первый важен для США. В связи с трудностями выбора и приобретения площадок, обеспечения охлаждающей водой и длительными срока-

ми сооружения наземных АЭС более предпочтительно массовое сооружение плавучих АЭС в континентальном шельфе. Кроме того, в США более половины населения страны живет в прибрежных районах. Первая такая АЭС с двумя реакторами PWR мощностью по 1150 *Мвт* (эл.) располагается в трех милях от берега (глубина 12—22 м) близ Нью-Джерси на заякоренной платформе за искусственным защитным волноломом. Производительность верфи в Джексонвиле для изготовления таких АЭС будет доведена в начале 80-х годов до четырех плавучих АЭС в год. Есть надежда впоследствии отказаться от дорогостоящих защитных волноломов.

Подземное сооружение АТЭЦ описано в докладе шведских специалистов. Необходимость и экономические условия атомной теплофикации требуют сокращения длины теплотрасс, что возможно в случае соблюдения условий безопасности при подземном сооружении станций.

Значительное внимание на конференции уделялось топливным ресурсам ЯЭ и удовлетворению потребности в ядерном горючем. За последние 10 лет в технике поисков урана наблюдается существенный прогресс. Средняя глубина бурения скважин увеличилась с 61 м в начале 60-х годов до 153 м в 1973 г., причем в значительном числе случаев бурение проводится на глубину 610—1200 м. В то же время содержание урана в обнаруженных месторождениях уменьшилось с 14,87 *кг/м³* (до 60-х годов) до 4,46 *кг/м³* в последние годы, что приведет к возрастанию затрат на добычу урана. Если и далее обнаружение урана возможно при существующих затратах 2,2 *долл.* на каждый дополнительный килограмм U_3O_8 , то капиталовложения в разведку урана для обеспечения его поставки на время службы АЭС с реактором LWR мощностью 1000 *Мвт* (эл.) будут меньше 10 млн. *долл.*, что составляет не более 2% капиталовложений собственно в АЭС. Поэтому неизбежное возрастание цен на уран допустимо, и оно приведет к незначительному влиянию на экономику ЯЭ. Потребность мировой ЯЭ в уране до 2000 г. оценивается в 5,2 млн. *т*, а потенциальные ресурсы урана с экономически приемлемой стоимостью (до 66 *долл./кг*) — в ~ 6,2 млн. *т*. В целом на данной конференции топливная проблема ядерной энергетики освещалась довольно оптимистично.

Что касается другого звена внешнего топливного цикла — регенерации отработавшего горючего, то здесь следует отметить получившие освещение экономические факторы, побуждающие к международной интеграции в этой области. Экономически оптимальной считается производительность регенерационной установки 5—6 *т/сутки* (1500—1800 *т/год*). Такая установка обеспечивает переработку горючего от АЭС с реакторами LWR суммарной мощностью 50—60 млн. *кВт* (эл.). Однако она очень дорогая и сложная. Этим объясняется объединение «регенерационных интересов» Великобритании, Франции и ФРГ.

Выступивший на конференции генеральный директор МАГАТЭ З. Эклунд сообщил, что международной интеграции внешнего топливного цикла будет посвящена конференция МАГАТЭ, которая состоится в 1977 г.

Связанные с развитием ЯЭ проблемы радиационной безопасности по материалам конференции считаются надежно разрешимыми. В отношении захоронения значительных количеств радиоактивных отходов эта уверенность базируется более чем на 20-летнем положительном опыте их хранения и достигнутым за последние годы значительным прогрессом в технологии обработки этих отходов (отверждение водных растворов).

На конференции одновременно проводился ряд мероприятий: пленарные и секционные заседания, семинары, лекции, беседы за круглым столом, пресс-конференции, технические экскурсии и кинофильмы. В связи с желанием значительного числа делегатов участвовать в дискуссиях, время для выступлений было сведено к минимуму: 6 и даже 2 минуты. Даже генеральные докладчики, делавшие обзоры по темам конференции, располагали временем 10—15 минут. Существенную помощь оказывал ежедневный бюллетень, освещавший и комментировавший работу конференции.

Общее для всех докладов по ядерно-энергетической тематике, а также для большинства выступлений во время дискуссий — довольно высокая степень оптимизма в отношении нынешнего состояния и будущего развития ЯЭ.

Следующая Мировая энергетическая конференция (МИРЭК X) состоится в 1977 г. в Стамбуле (Турция).

КОРЯКИН Ю. И.

Об интенсификации теплообмена в каналах реакторов типа РБМК

В Москве под председательством акад. Н. А. Доллежаля в начале апреля 1974 г. состоялось совещание по интенсификации теплообмена в каналах реакторов типа РБМК, которое обсудило состояние вопроса, результаты экспериментальных работ и пути дальнейших исследований.

Рассмотрена задача повышения электрической мощности блока АЭС с реакторами типа РБМК при сохранении размеров и числа технологических каналов, а также основного реакторного оборудования. Увеличение тепловой мощности каналов до 4500 кВт не должно приводить к возникновению кризиса теплоотдачи при повышенных плотностях теплового потока и паросодержаниях теплоносителя. Кроме того, необходимо сохранение температуры наружной поверхности стенки технологического канала и максимальной температуры графитового замедлителя на допустимых уровнях. Потери напора по контуру циркуляции должны быть ограничены величиной 18,6 бар. Путем оптимизации расположения твэлов в поперечном сечении тепловыделяющей сборки можно выровнять распределение параметров теплоносителя по ее сечению, что позволяет повысить критические плотности тепловых потоков. Расчетные и экспериментальные работы по гидродинамической оптимизации расположения твэлов в сборке показали, что, изменяя их расположение, можно повысить критическую мощность сборки на 5—10%.

Увеличение внутреннего диаметра канала с 80 до 82 мм путем уменьшения толщины его стенки позволяет дополнительно поднять мощность канала на 5—7% при сохранении допустимых значений гидравлического сопротивления.

Повышение мощности канала до 4500 кВт без изменения конструкции канала и твэлов при сохранении принятой загрузки горючего может быть достигнуто путем использования в активной зоне интенсификаторов теплообмена, позволяющих увеличить паросодержание на выходе из максимально напряженного канала до 50—70%, а среднее по реактору — до 30—40%. В этом случае резко уменьшается общий расход теплоносителя через реактор, что приводит к снижению затрат электроэнергии на собственные нужды.

На основании экспериментальных данных, полученных в различных научно-исследовательских организациях страны, рассчитаны теплогидравлические характеристики канала с внутренним диаметром 80 и 82 мм при мощностях 4200 и 4500 кВт для тепловыделяющих сборок с твэлами диаметром 13,5 мм и различными интенсификаторами теплообмена. В расчетах принималось, что нижняя тепловыделяющая сборка имеет 10 штатных дистанционирующих решеток, а верхняя —

20 дистанционирующих решеток с интенсификаторами теплообмена. Коэффициент местного гидравлического сопротивления для решеток с интенсификаторами принимался равным 2,5 вместо 0,5 для штатных решеток.

Расчеты показали, что при допустимом гидравлическом сопротивлении контура 18,6 бар, внутреннем диаметре канала 80 мм, мощности канала 4500 кВт и максимальной плотности теплового потока 1,16 Мвт/м² максимальное паросодержание составляет ~65%. Предварительные результаты теплогидравлических исследований указывают на возможность достижения таких паросодержаний.

Обсуждались результаты теплогидравлических исследований моделей каналов с различными интенсификаторами, полученные в последнее время в различных научно-исследовательских организациях. Все исследования выполнялись по общепризнанной методике: экспериментальные участки обогревались током низкого напряжения, а выход на кризис теплообмена достигался плавным повышением электрической мощности вплоть до изменения температурного режима стержней при постоянном давлении, расходе и энthalпии на входе.

Были доложены результаты экспериментального исследования кризиса теплоотдачи в стержневых сборках с дистанционирующими решетками с локальными интенсификаторами — завихрителями, расположенными в них и дискретно установленными по всей высоте сборки с шагом 125 мм. Интенсификатор состоял из шести пар отрезков скрученных лент переменного сечения, радиально расположенных под углом 60° друг к другу.

Опыты проводились на сборках из семи тепловыделяющих цилиндрических стержней — имитаторов твэлов диаметром 12 мм и обогреваемой длиной 2200 мм, расположенных по правильной треугольной решетке в канале диаметром 45,5 мм. Опытные данные получены при давлениях 68,5; 88,1 и 117,6 бар и массовых скоростях 600, 800, 1000 и 1500 кг/м²·сек.

Сопоставление опытных данных, полученных как с интенсификаторами, так и без них, показало, что интенсификаторы вызывают прирост мощности до 50%, а гидравлическое сопротивление возрастает в 1,5 раза. Кроме того, применение интенсификаторов существенно расширяет область бескризисной работы сборок и повышает величину критической плотности теплового потока.

Полученный эффект объясняют наличием вращательного движения потока теплоносителя при его прохождении через завихритель и сепарацией влаги из ядра потока на тепловыделяющую поверхность стержней. Кроме того, закрутка теплоносителя способ-