

установки по энерготехнологическому использованию НТР и с применением газотурбинного цикла намечено построить в течение следующего десятилетия. По мнению специалистов, наиболее освоенным в настоящее время процессом, использующим высокотемпературное тепло НТР и предполагаемым к первоочередному внедрению, по-видимому, будет получение синтетического газообразного или жидкого топлива из угля. Этот путь рассматривается как один из основных в программе будущего энергообеспечения стран, располагающих значительными запасами бурых и каменных углей.

На заседании Технического комитета обсуждалась возможная стратегия развития ядерной энергетики с включением в нее НТР и быстрых гелиевых реакторов-размножителей с коротким временем удвоения. Работы по быстрым реакторам проводятся в рамках европейских групп и направлены в основном на исследование безопасности, отработку принципиальных конструктивных особенностей и реакторные испытания по воздействию высоких потоков на конструкционные материалы и топливные композиции.

Международная рабочая группа по НТР наметила программу деятельности и рекомендовала проведение совещаний специалистов в рамках МАГАТЭ в 1978—1979 гг., на которых будут рассмотрены наиболее актуальные аспекты НТР, что позволит специалистам разных стран обменяться мнениями и обсудить конкретные проблемы и пути их решения. Для участия в рабочей группе по НТР в 1978 г. решено пригласить специалистов Италии, Испании, Швеции.

Широкие возможности применения НТР и связанный с этим большой объем исследований побуждают многие страны объединять усилия с целью концентрации работы и сокращения сроков и затрат на исследование и создание установок. Международное сотрудничество в рамках МАГАТЭ является важным условием для успешного развития концепции НТР. На оказание всесторонней помощи в этом вопросе и будет направлена деятельность созданной при МАГАТЭ Международной рабочей группы по НТР.

ГРЕБЕННИК В. Н.

Совещание экспертов МАГАТЭ по термоядерным реакторам

На совещании, состоявшемся в октябре 1977 г. в Медисоне (США), рассматривались проекты термоядерных реакторов, разрабатываемых в настоящее время. Были представлены проекты: 1) установок TFTR, JT-60, JET, T-10M, которые будут сооружаться после T-10 и PLT. На этих установках должны быть получены реакторные параметры плазмы; 2) реакторов для получения зажигания термоядерной реакции и изучения взаимодействия α -частиц с плазмой. Их предполагается строить вслед за установками типа TFTR и JET; 3) реакторов для изучения воспроизводства трития, процессов, протекающих в blanket, и доказывающих возможность выработки электрической энергии для сторонних потребителей; 4) демонстрационных реакторов, т. е. прототипов термоядерных электростанций, показывающих экономическую целесообразность создания конкурентоспособных термоядерных электростанций. Основное внимание участники совещания уделили проектам, указанным в пп. 2 и 3. По четырем проектам п. 1 были сделаны информационные доклады о состоянии разработок; демонстрационные реакторы (п. 4) проработаны недостаточно.

На пленарных заседаниях проектам и отдельным инженерным и технологическим вопросам реакторов типа токамак было посвящено 24 доклада, реакторов с инерциальным удержанием — 9, на основе открытых ловушек — 4, экономическим вопросам и планированию — 6. Остальные доклады касались различных инженерно-физических проблем и реакторов других типов.

Вслед за США и Советским Союзом Япония и страны Западной Европы приступили к разработке программ создания термоядерных электростанций на основе токамака. В программе Японии рассматриваются две возможности достижения поставленной цели — быстрое осуществление первого шага на базе техники сегодняшнего дня без использования сверхпроводников или одновременное решение физических и инженерных задач (с применением сверхпроводников), но более медленными темпами. Европейская программа предполагает параллельное сооружение установок, удовлетворяющих

требованиям пп. 2 и 3, с использованием в них по возможности одинаковых инженерных решений. Работа над обеими программами далека от завершения.

Наиболее перспективными и глубоко проработанными продолжают оставаться токамаки. Получаемые на них параметры плазмы существенно продвинулись к термоядерным, а оптимизация проектов идет по линии приближения характеристик будущих реакторов к достигнутому на имеющихся установках. Так, отношение необходимой для реактора длительности процесса к полученной экспериментально с 1974 г. сократилось с 10 000 до 60. Температура ионов и параметр удержания энергии η всего на порядок меньше необходимых для реактора.

Совершенствуются проекты термоядерных реакторов токамаков — уменьшаются их габариты и упрощается конструкция. Это достаточно ясно прослеживается в работах Висконсинского университета, Аргоннской национальной лаборатории, Принстонской лаборатории. В представленных ими проектах нет дивертера, управляющие обмотки вынесены наружу. Энергетический цикл снижен до ~ 60 с, геометрические размеры уменьшены за счет увеличения тороидального магнитного поля. Отмечалось, что за счет упрощения конструкции можно сделать токамак конкурентоспособным.

По мере углубления проектных проработок все большее место начинают занимать экономические расчеты. Было представлено несколько докладов о вычислительных кодах, которые позволяют решать задачу получения заданных параметров плазмы при минимальной стоимости. Следует отметить, что, хотя не все коды дают верные результаты, с помощью подобного метода расчетов удалось оптимизировать параметры и довольно точно предсказать стоимость TFTR.

На совещании работало пять секций: термоядерные реакторы токамаки, демонстрационные и промышленные энергетические реакторы токамаки, термоядерные реакторы с магнитным удержанием, реакторы с инерциальным удержанием, роль и место термоядерных реакторов.

Экспериментальные данные многих параметров позволяют достаточно надежно их экстраполировать до реакторных значений. При этом получаются приемлемые результаты даже для пессимистичных вариантов прогноза. Для уверенного проектирования энергетических реакторов необходима дальнейшая разработка физики плазмы: выяснение зависимости энергетического времени жизни от температуры ионов; изучение взаимодействия плазмы со стенками и методов предохранения плазмы от примесей; полномасштабный эксперимент по дополнительному нагреву плазмы; изучение поведения в плазме продуктов ядерных реакций и прежде всего α -частиц.

На секции, посвященной рассмотрению роли и места термоядерных реакторов, обсуждались проблемы и перспективы как чистых, так и гибридных термоядерных реакторов. Особое внимание обращалось на безопасность, экономические и социальные проблемы, наличие топливных и материальных ресурсов, экономические характеристики программы исследований.

Нашло дальнейшее подтверждение мнение, что чистые термоядерные реакторы безопаснее других ядерных установок. Значительно лучше разработаны экологические вопросы.

ПОПКОВ Г. Н.

Седьмая Международная конференция по атомным столкновениям в твердом теле

Конференция состоялась в сентябре 1977 г. в МГУ. Около 80 докладов из 240 представленных на эту конференцию касались взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерного реактора. В обзорных докладах М. Каминского (США), Р. Берипа и А. Шерпера (ФРГ) обобщались результаты исследований, выполненных в различных лабораториях.

В настоящее время дальнейшее продвижение наиболее развитого направления термоядерных исследований — токамаков — зависит от того, удастся ли уменьшить взаимодействие плазмы со стенкой установки. Эта проблема включает защиту плазмы от влияния стенки (уменьшение количества атомов примесей, которые ее охлаждают) и защиту стенки от разрушающего воздействия плазмы (увеличение времени жизни стенки).

В установках нынешнего поколения наиболее важным является уменьшение потока атомов примесей со стенки в плазму. Этот поток возникает в результате некоторых элементарных процессов, которые сами по себе изучаются довольно давно. Сейчас задача состоит в том, чтобы объединить исследования элементарных процессов, выполняемых на монокинетических пучках частиц, с исследованиями, проводимыми в плазменных установках. Для этого необходимы детальные сведения о потоках частиц, бомбардирующих стенки камеры в токамаках.

В обзорном докладе Р. Берипа и А. Шерпера рассматривались условия на границе плазмы в тороидальной установке и приводились результаты измерения потоков энергии, атомов водорода и атомов примесей в течи диафрагмы на установках DITE и TFR. Отмечается, что интерпретировать измерения трудно, а полученные из них оценки потоков (10^{15} — 10^{16} атом/см²·с — атомов водорода и 10^{11} — 10^{13} атом/см²·с — атомов примесей) довольно грубы. Потоки частиц и их энергетические распределения зависят от условий разряда.

Значительные успехи достигнуты в понимании места и перспектив гибридного термоядерного реактора. Безопасность таких реакторов мало отличается от аналогичных проблем реакторов деления. Они могут сооружаться на основе токамаков, систем с инерционным удержанием и, по-видимому, на основе зеркальных ловушек. Соответствующая программа разрабатывается пока только в СССР.

Совещание экспертов обратило внимание на целесообразность разработки программы, предусматривающей удовлетворение термоядерными реакторами значительной доли (например 10%) мировых энергетических потребностей в начале XXI в.; создания установок для технологических испытаний; разработки материалов со сроком службы более 10 МВт·лет/м²; повышения энергонапряженности элементов реакторов; разработки методов замены первой стенки и blanketа. Отмечена необходимость ускорения разработок установок следующих поколений с тем, чтобы быть готовыми вписать в мировой энергетический баланс в начале XXI в., когда потенциальные потребности могут превысить мощности источников энергии.

Приблизительно такие же потоки ионов водорода на стенку ожидаются в будущих реакторах. Энергия частиц будет, вероятно, находиться в диапазоне 1 эВ — 100 кэВ с максимумом 0,1—1 кэВ. Будут реализовываться все возможные углы падения частиц на поверхность. Некоторая доля частиц будет непрерывно отражаться от поверхности и возвращаться в плазму, а остальные — захватываться материалом стенки.

При взаимодействии плазмы со стенкой реализуются: 1) десорбция атомов поверхностных слоев ионами, электронами и электромагнитным излучением; 2) распыление (физическое и химическое); 3) обратное рассеяние ионов; 4) захват ионов поверхностями и реэмиссия атомов газа; 5) поверхностные изменения, вызванные продолжительной ионной бомбардировкой (например, блистеринг); 6) испарение и разложение материала вследствие перегрева поверхности.

Данные по десорбции относятся в подавляющем большинстве к электронной и фотонной десорбции с хорошо подготовленных, гладких поверхностей, и лишь очень немногие исследования относятся к ионной десорбции. Обратное рассеяние ионов исследуется расчетным путем, и хорошее совпадение с экспериментом в области энергии 1—10 кэВ вызывает доверие к расчетам в области 100 эВ, где измерения очень трудны. При рассеянии ионов водорода различными металлами экспериментальные значения коэффициента отражения частиц и коэффициента отражения энергии составляют около 10% при энергии падающих частиц ~ 1 кэВ.

Надежных данных о распылении ионами водорода недостаточно, нет данных о распылении тритием. Имеющиеся данные относятся главным образом к чистым металлам. Однако более перспективным представляется поиск материала с низким коэффициентом распыления среди сложных веществ: боридов, карбидов и нитридов легких элементов или их сплавов. Кроме того, поиск