

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.

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 бляжета. Отмечена необходимость ускорения разработок установок следующих поколений с тем, чтобы быть готовыми вписаться в мировой энергетический баланс в начале XXI в., когда потенциальные потребности могут превысить мощности источников энергии.

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. Бериша и А. Шерцера (ФРГ) обобщались результаты исследований, выполненных в различных лабораториях.

В настоящее время дальнейшее продвижение наиболее разностороннего 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. Бериша и А. Шерцера рассматривались условия на границе плазмы в тороидальной установке и приводились результаты измерения потоков энергии, атомов водорода и атомов примесей в тени 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^{14} – 10^{15} атом/см²·с — атомов примесей) довольно грубы. Потоки частиц и их энергетические распределения зависят от условий разряда.

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, эти данные 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

затруднен вследствие того, что не известны угловые и энергетические распределения бомбардирующих частиц из плазмы. Между тем максимумы расчетных кривых коэффициента распыления для некоторых сложных материалов находятся при различных энергиях бомбардирующих ионов.

Измерения по распылению нейтронами, выполненные в последнее время, дали коэффициент ниже 10^{-4} атом/нейтр. «Чанки» не будут возникать при облучении отожженной и отполированной поверхности. У такой поверхности сняты напряжения в приповерхностном слое и удалены микротрещины.

Химическое распыление является довольно сильным процессом и представляет большую опасность для материалов с низким Z : графита, карбидов и изоляторов, которые имеют высокую реакционную способность с ионами водорода и кислорода. Такое распыление чувствительно к температуре как всякий механизм, включающий химические реакции. Например, распыление пиролитического графита ионами водорода максимально при $400-800^\circ\text{C}$ ($S \sim 0,08$ атом/ион для ионов H^+ энергией 2 кэВ). Возможно, что эрозию поверхности вследствие химического распыления удастся снизить за счет выбора и поддержания оптимальной температуры поверхности. Однако насколько возможно будет использовать этот эффект, сейчас сказать трудно.

Интенсивно исследуются методы уменьшения эрозии поверхности блистерингом. Долгое время блистеринг считали серьезным механизмом эрозии в будущих реакторах, поскольку предполагалось, что этот процесс может повториться многократно. Представления основывались на экспериментах, в которых облучение проводилось моноэнергетическими ионами. Однако недавно было установлено, что при облучении металлов частицами с широким спектром энергий, который, по-видимому, и будет реализоваться в реакторе, блистеринг эффективно подавляется. Подавление обусловлено равномерным распределением вакансий по толщине облучаемого материала и образованием пористой структуры, обеспечивающей выход газа из глубины и таким образом препятствующей дальнейшему образованию блистеров. Появление пористой структуры и отсутствие блистерообразования наблюдалось также при облучении металлов достаточно высокой температуры (до $0,4-0,5 T_{\text{пл}}$). Неясно, однако, можно ли будет в реакторах поддерживать столь высокую температуру стенки. Блистеринг существенно уменьшается в материалах с малым размером зерен (и дисперсной второй фазой), таких, как спеченные порошки бериллия и алюминия.

Атомы и ионы водорода и примесей, бомбардирующие первую стенку во время разряда, в свою очередь вызывают десорбцию и распыление адсорбированных слоев и металла стенки, воспроизводя и увеличивая количество примесей в плазме. На нынешнем этапе концентрация примесей в плазме гораздо выше, чем в газе, заполняющем камеру перед разрядом. Чтобы создать условия, необходимые для возникновения самоподдерживающейся реакции, концентрация примесей должна быть снижена во много раз.

Атомы кислорода и углерода, загрязняющие плазму, поступают в нее, по-видимому, в результате десорбции H_2O , CO , CO_2 и углеводородов со стенок камеры. Естественно поэтому стремление иметь перед началом разряда камеру с максимально чистыми стенками. В качестве перспективного способа очистки от загрязнений рассматривается облучение поверхностей металла потоками атомарного водорода и образование летучих соединений, которые затем откачиваются. Этот способ реализуется в той или иной мере при проведении в плазменных установках тренировочных разрядов на водороде при низких параметрах: $T_e \sim 3$ эВ, $n_e \sim 10^{12}$ см $^{-3}$, $I_{\text{разр}} \sim 1-10$ кА. Он успешно применялся для очистки камер от кислорода на установках DITE и Alkator. Однако было обнаружено, что при уменьшении в плазме концентрации кислорода возрастает концентрация металлических примесей, а это еще более ухудшает ее параметры. Увеличение потока атомов металла в плазму можно отчасти объяснить распылением стенки камеры, лишившейся защитного покрытия чужеродных атомов. В этой связи ведутся исследования эффектов, к которым может приводить охрупчивание поверхностей металлов, облучаемых потоками атомарного водорода. Сейчас известно, например, что охрупчивание металлов в водороде может вызывать отслоение и извержение значительных количеств очень мелких частиц металла. Этот пример показывает, что проблема примесей может стать еще более трудной, когда стенка становится чище.

По-прежнему неизученными остаются процессы, возникающие при одновременном воздействии на поверхность металла различных видов частиц и радиации, например, при одновременной бомбардировке поверхности ионами водорода и более тяжелыми ионами.

Труды конференции, которые предполагается издать, несомненно представят интерес для специалистов, работающих в области УТС.

ЧИЧЕРОВ В. М.

I Международный семинар по использованию протонных пучков в лучевой терапии

Семинар был организован ГКАЭ и АМН СССР и проходил в Онкологическом научном центре АМН СССР (Москва) в декабре 1977 г.

Над проблемой использования протонных пучков в медицине физики и клиницисты работают уже более 20 лет. Протонные пучки в силу особенностей взаимодействия с веществом позволяют формировать в теле больного четко очерченные дозные поля любой заранее заданной формы и высокого краевого градиента. В связи с этим открывается уникальная возможность поражать мишени (опухоли), которые локализованы в лю-

бой части тела больного, не повреждая расположенные рядом критические органы и структуры, а также организм в целом. К настоящему времени в мире накоплен большой радиобиологический опыт использования протонов и опыт лучевого лечения более 2500 больных. В Советском Союзе исследования и клиническая работа ведутся на базе ускорителей ОИЯИ, ИТЭФа и ЛИЯФа им. Б. П. Константинова.

Помимо лучевой терапии представляется весьма перспективным использовать протонные пучки в клинической диагностике. С этой целью могут эффективно