

В.А. КУРНАЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОБЗОР ДАННЫХ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Тематика исследований в нашей стране по взаимодействию плазмы с поверхностью применительно к проблемам управляемого термоядерного синтеза достаточно широка, и если разделить эти исследования на те, которые проводятся непосредственно в термоядерных установках, и те, которые можно отнести к экспериментальному, компьютерному и теоретическому моделированию, то последние явно преобладают. Это объясняется узостью и экспериментальной базы, крупнейшей установкой которой является токамак Т-10 без дивертора с круглым сечением плазмы, давно уступающий по параметрам и возможностям проведения подобных исследований множеству зарубежных установок, а единственным токамаком с дивертором является скромный по размерам сферический токамак Глобус-М. На этом токамаке недавно начаты целенаправленные исследования по взаимодействию плазмы с материалами. Интенсивная и многообещающая программа исследований возможностей применения лития как обращенного к плазме материала (ОПМ) выполняется на токамаке Т-11 в ТРИНИТИ.

В области же экспериментальных исследований взаимодействия импульсных потоков плазмы с поверхностью, моделирующих переходные процессы в токамаках, ЭЛМы и срывы, мы пока держим передовые позиции за счет активных экспериментов на ускорителях КСПУ и МК-200 в ТРИНИТИ, долгое время не имевших аналогов за рубежом. Более того, база этих исследований в последние годы расширилась за счет создания во ВНИИНМ установки КСПУ-Ве для работы с бериллием и начала исследований по взаимодействию с мишенями мощных потоков электронов на установке ГОЛ-3 в Новосибирске.

Линейные стационарные симуляторы с продольным магнитным полем, число которых в мире непрерывно растет, а параметры плазмы приближаются к ожидаемому в диверторе ИТЭР (Pilot-PSI, Magnum) за счет использования дуговых источников плазмы и сильного магнитного поля, у нас представлены установками с плазменно-пучковым разрядом, инициированным электронным пучком. Это ЛЕНТА в Курчатовском институте (НИЦ КИ) и ПР-2 в МИФИ. Если на установке Pilot PSI можно получать

плазму с концентрацией до  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , то на наших установках максимальная плотность плазмы примерно на два порядка ниже.

Недостаток современных крупных линейных симуляторов компенсируется усиленным вниманием к физике происходящих при взаимодействии плазмы с поверхностью процессов, которая изучается на множестве лабораторных установок. Причем число таких установок и тематика исследований непрерывно расширяются. Здесь уместно упомянуть МИФИ, где за последние несколько лет создан ряд новых установок и стендов. К ним относятся и сверхвысоковакуумный термодесорбционный стенд, многофункциональная установка МИКМА с возможностью облучения образцов как плазмой, так и атомами твердых мишеней, магнетронная установка МР-2 с возможностью термодесорбционных исследований захвата изотопов водорода в облученные материалы и покрытия непосредственно в установке. Особый интерес представляет запущенный в прошлом году стенд для осаждения покрытий и испытания материалов (установка CODMATТ) в условиях, близких к условиям ИТЭР. В стенде возможны режимы воздействия ионов и плазмы на материалы при плотностях мощности до  $20 \text{ МВт/м}^2$  и частотой повторения до  $1 \text{ кГц}$ .

В НИЦ КИ заработала установка, в которой возможно сочетание одновременного облучения потоком ионов кэвной энергии и интенсивным электронным пучком ( $2.5 \text{ кэВ}$ ,  $0.15\text{-}1.5 \text{ А/см}^2$ ).

Расширяется также круг методик, используемых для анализа взаимодействия плазмы с поверхностью не только за счет использования современных аналитических установок, таких как ионный резак, электронные микроскопы с элементным анализом, различные дифрактометры, синхротрон, но и за счет создания принципиально новых методов, таких как, например, спектроскопия ионного рассеяния при анализе толщины и состава пленок на поверхности при плазменном воздействии (МИФИ).

Среди новых экспериментальных результатов, существенно дополняющих базу данных по взаимодействию плазмы с материалами ТЯР и расширяющих физические представления о физике взаимодействия плазмы с поверхностью, следует упомянуть полученные в НИЦ КИ результаты по драматическому увеличению скорости распыления материала под действием ионов при дополнительном облучении его интенсивным потоком электронов. В принципе, ситуация, которая должна быть характерна для ТЯР, когда на обращенную к плазме поверхность одновременно с ионами могут приходиться много электронов из хвоста максвелловского распределения.

Кроме того, впервые показано (МИФИ), что при наличии на поверхности ОПМ тонких оксидных слоев (что может быть характерно для Ве и W) в трубке плазмы, связанной с такой поверхностью, могут возникать осцилляции, сопровождаемые ростом пристеночной разницы потенциалов (и как следствие облучением поверхности ускоренными в пристеночном слое ионами плазмы). Построенная модель такого взаимодействия объяснила особенности наблюдаемой вольт-амперной характеристики перехода плазма-поверхность, включая ступенчатое изменение тока и наличие участка с отрицательным сопротивлением.

Исследования поведения ОПМ при нагрузках, соответствующих срывам и мощным ЭЛМа на КСПУ-Ве и КСПУ-Т (ТРИНИТИ, ВНИИНМ) в частности показали, что эрозия Ве значительно увеличивается с ростом температуры от 250 до 500 °С, что может потребовать более эффективно, чем сейчас предусмотрено в ИТЭР, охлаждения. Наблюдалась неожиданная отличная динамика эволюции поверхности разных нержавеющей сталей для патрубков ИТЭР под действием излучения из зоны взаимодействия плазменного потока с мишенью.

Большой объем работ (МИФИ, ТРИНИТИ) был выполнен по накоплению дейтерия в ОПМ. Оказалось, что захват дейтерия при высоких скоростях осаждения W на КСПУ-Т близок к ранее предложенному скейлингу. Интенсивно изучалось влияние радиационных дефектов на накопление дейтерия в W. Если в НИЦ КИ для создания дефектов использовали циклотрон (ионы H, He, Li, C с энергией 1-60 МэВ), то в совместных исследованиях ИРР (Гархинг) и МИФИ использовались ионы W с энергией 20 МэВ. В частности, было показано (Ю.М.Гаспарян и др.), что даже при высокой температуре стенки (500 °С) дейтерий удерживается дефектами.

При исследовании углеводородных пленок на материалах (МИФИ) показано, что присутствующие в плазме ВЧ колебания способствуют их осаждению в затененных от плазмы областях, и, наоборот, при очистке этих осадений с помощью кислорода значительно ускоряют процесс.

Отдельного обсуждения заслуживают работы по защите W возобновляемыми покрытиями из карбида бора (Л.Б.Беграббеков и др. МИФИ). Демонстрация возможности такого решения позволила бы «снять» проблему разрушения W при термоциклировании за счет ЭЛМов.

Теоретические исследования процессов взаимодействия плазмы и ее компонент с поверхностью в нашей стране по сравнению с другими странами имеют больший удельный вес. Выделяются работы, проводимые Ю.В. Мартыненко (НИЦ КИ), который за последнее время опубликовал модель формирования пуха на облучаемой ионами гелия горячей поверх-

ности вольфрама, модель образования пыли из осаждаемых на поверхности стенок токамака пленок, модель формирования трещин при циклических тепловых испытаниях вольфрама. Интересно предсказание, что самые опасные параллельные поверхности трещины могут возникать только в тонких слоях и потому не опасны для ИТЭРа. А.Б. Кукушкин и др. теоретически исследовали большие углеродные молекулы и формирование из них углеводородных депозитов в токамаке Т-10 с точки зрения их диагностики.

Новая модель, описывающая пластическую деформацию в материалах с хрупко-вязким переходом при нагретом приповерхностном слое, условия образования и эволюцию трещин при импульсных тепловых нагрузках, развита в работах А.С.Аракчеева и др. (ИЯФ СО РАН).

Теоретически захват и накопление изотопов водорода в обращенных к плазме материалах (ОПМ) изучался в совместных работах Е.Д. Маренкова (МИФИ) и проф. С.Г. Крашенинникова (США). В частности, предложена модель с непрерывным по энергиям спектром ловушек в подвергнутых воздействию плазмы ОПМ, которая объяснила экспериментально наблюдаемые термодесорбционные спектры (ТДС) и временную зависимость газовыделения в токамаке JET. Ими же предсказана неустойчивость поверхностно-плазменного обмена, вызванная температурной зависимостью газовыделения из ОПМ и повышенными радиационными потерями из плазмы при росте концентрации за счет усиления газовыделения стенки.

Наряду с аналитическим исследованием особенностей взаимодействия плазмы с поверхностью совершенствуются компьютерные коды. Ранее разработанный в МИФИ Монте-Карло код SCATTER, алгоритмически близкий к хорошо известному коду TRIM, усовершенствован Д. Когутом для описания эволюции под действием облучения ионами и нейтралами перезарядки из плазмы 3D объектов на поверхности ОПМ, таких как трещины, капли и ямки. Количественно определены параметры перепыления, эрозии и изменения компонентного состава диагностических зеркал, находящихся внутри подверженных облучению нейтралами перезарядки патрубков из нержавеющей стали, а также найдена эволюция захвата трития при распылении и переосаждении на поверхности первой стенки атомов Ве с учетом ее шероховатости. Интересно отметить, что при определенном содержании бериллия в пристеночной плазме ИТЭР накопление трития в стенке с дозой начинает уменьшаться.

В докладе представлены также другие интересные результаты.