

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 2.7. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

Программа 2.7.1. Физика высокотемпературной термоядерной плазмы

В течение 2007 г. как проводились экспериментальные работы, направленные на выяснение физических механизмов, обеспечивающих устойчивость плазмы в ГОЛ-3 (рис. 32), так и развивались аналитическая теория и численная модель.

Обнаружено, что в обеспечении поперечной устойчивости плазмы важную роль играет сильный шир магнитного поля (т. е. разная спиральность магнитного поля на разных радиусах плазмы), который формируется самосогласованными токами, текущими вдоль плазменного столба. Эти же измерения показали, что вблизи оси запас устойчивости крайне мал, $q(0) \sim 0,4$, поэтому в некоторых режимах можно ожидать неустойчивости, подобной пилообразным колебаниям в токамаках.

Работы по аналитической теории показали, что и в многопробочной ловушке с наблюдаемым распределением продольного тока существуют и развиваются известные моды неустойчивостей. Однако магнитный шир действительно является сильным стабилизирующим фактором для перестановочных и баллонных мод. При «изолированных» торцах инкремент неустойчивости уменьшается за счет возрастания инерции трубки тока. В пределе сильного подавления происходит переход к модам Мерсье. При «вмороженных» торцах происходит переход от «баллонных» мод к модам Мерсье



Рис. 32. Ускоритель У-2 в составе комплекса ГОЛ-3.

при увеличении длины ловушки. Обычно считающаяся основным стабилизирующим фактором диамагнитная магнитная яма в обсуждаемых условиях слабо влияет на устойчивость желобков, все определяется кривизной силовых линий.

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера в рамках модернизации установок ГДЛ с целью дальнейшего повышения температуры электронов и других параметров плазмы произведена замена трех из шести модулей атомарных инжекторов на модули нового поколения, которые позволяют формировать фокусированные пучки атомов водорода с мощностью до 700 кВт, длительностью 5 мс и энергией атомов до 25 кэВ. Суммарная мощность атомарных пучков достигла при этом 3,5 МВт. В результате в экспериментах удалось достичь рекордной для ГДЛ температуры электронов до 180 эВ при плотности мишенной плазмы $\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Сравнение результатов эксперимента с данными численного моделирования позволяет сделать утверждение, что нагрев плазмы осуществляется в результате кулоновского торможения быстрых ионов на электронах плазмы, а максимальная температура в стационарном режиме определяется балансом между захваченной в плазму мощностью и мощностью продольных потерь при газодинамическом истечении мишенной плазмы.

Основываясь на этом утверждении, можно сделать уверенные численные предсказания, что при полной мощности инжекции в 10 МВт температура электронов плазмы превысит 300 эВ (см. верхнюю кривую на рис. 33), что при переходе на дейтерий-третиевую плазму будет соответствовать условиям в источнике 14 МэВ термоядерных нейтронов с плотностью потока $0,5 \text{ МВт/м}^2$.

На том же рисунке приведены результаты измерения электронной температуры на оси установки при помощи системы лазерного рассеяния в различные моменты времени после начала инжекции. Сплошной кривой показаны данные численных расчетов при помощи интегрированного кода ITCS. В экспериментах по квазистационарному удержанию двухком-

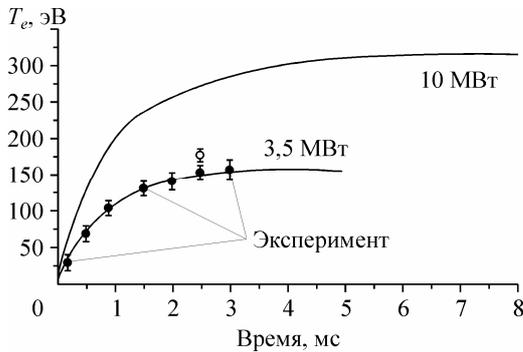


Рис. 33. Суммарная мощность атомарных пучков в зависимости от времени (численная модель и эксперимент — нижняя кривая) и зависимость температуры электронной плазмы от времени — верхняя кривая (старт атомарной инжекции в 3,5 мс по шкале времени).

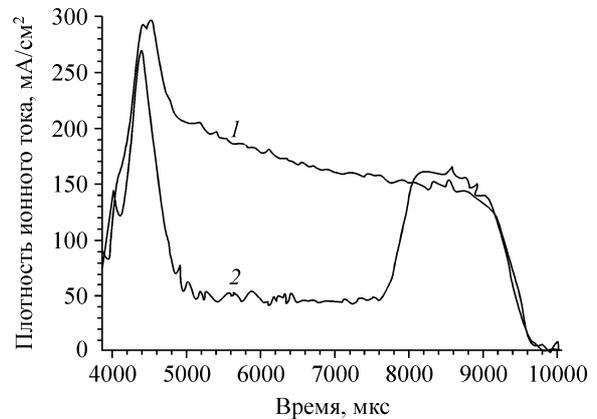


Рис. 34. Плотность тока ионов на оси в расширителе за КП.

1 — без инжекции в КП, 2 — при инжекции пучков в КП и накоплении в нем быстрых ионов.

понентной плазмы с высоким относительным давлением плотности быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ достигала $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Параметр β при этом превысил значение 44 % (рис. 33).

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера проведена серия экспериментов по созданию плазмоида анизотропных горячих ионов в компактном пробкотроне малого объема (КП), присоединенном к одной из пробок установки ГДЛ. Для создания плазмоида использовалась 90-градусная инжекция двух фокусированных

атомарных пучков с суммарной мощностью 1 МВт и энергией частиц 23 кэВ. Плотность ионов со средней энергией около 15 кэВ в пробкотроне достигла $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что втрое превышает соответствующую плотность ионов, достигнутую в свое время на установке ТМХ при мощности атомарных пучков 3,5 МВт. При этом зарегистрировано четырехкратное уменьшение продольных потерь частиц из основного пробкотрона ГДЛ, которое связано с эффектом амбиполярного запираения (рис. 34).

Программа 2.7.2. Физика низкотемпературной плазмы

Учеными Института сильноточной электроники разработаны установки для исследования и применения разряда атмосферного давления в вихревом потоке газа. По своей конструкции газоразрядное устройство сходно с классическим дуговым плазмотроном (рис. 35). Однако, в отличие от дугового плаз-

матрона, здесь используется особая форма разряда: слаботочный разряд типа тлеющего, на который (в результате спонтанных переходов тлеющего разряда в искровой) накладываются кратковременные сильноточные импульсы с типичной длительностью около 100 нс. Средний ток разряда составляет 0,1—0,2 А при

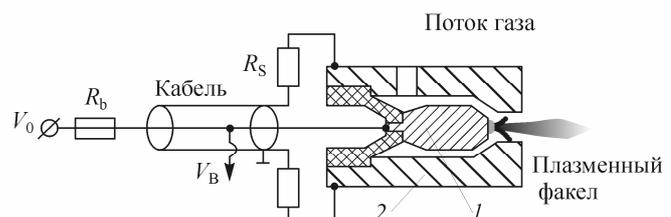
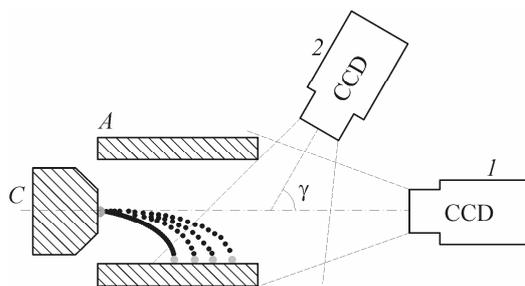


Рис. 35. Устройство плазменно-вихревой горелки и схема оптических наблюдений с помощью ССД камеры.

R_b — балластное сопротивление; R_s — шунт для регистрации тока разряда; V_B — напряжение горения разряда.

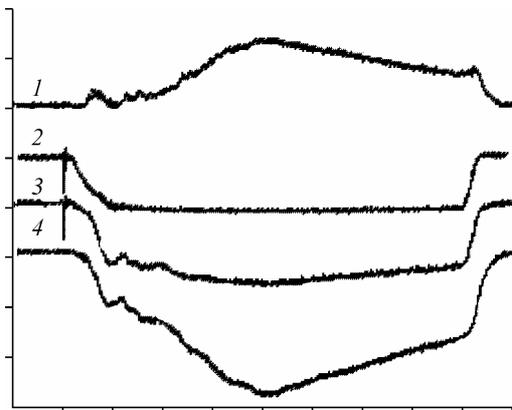


Рис. 36. Характерные осциллограммы токов плазмонаполненного диода в отсутствие внешнего магнитного поля при давлении $p = 0,05$ Па, ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 15$ кВ.

1 — ток в цепи трубы дрейфа; 2 — ток разряда; 3 — ток эмиссии; 4 — ток коллектора. Чувствительность 100 А/дел., развертка 25 мкс/дел.

среднем напряжении горения от 0,5 до 3 кВ. Типичная средняя мощность, выделяемая в разряде, составляет менее 200 Вт, и нагрев газа не превышает нескольких сотен Кельвина. Тем не менее, разряд является эффективным источником для инициирования процесса горения в смесях воздуха с газообразными углево-

дородами. Данное устройство перспективно для применений, связанных как с осуществлением полного сгорания углеводородов, так и с их конверсией в промежуточные продукты.

В этом же Институте показано, что при эмиссии электронов из плазменного катода, формировании и транспортировке низкоэнергетического сильноточного пучка в плазмонаполненном диоде ускоренные в прикатодном слое до энергии 15—20 кэВ ионы анодной плазмы повышают эмиссионную способность плазменного катода. Кроме того, дополнительную эмиссию обеспечивают и электроны, образующиеся на катоде в результате ионно-электронной эмиссии. При постоянном токе разряда в плазменном катоде $I_p = 100$ А получено увеличение тока эмиссии до $I_3 = 200$ А и пропорциональное увеличение энергии электронного пучка на коллекторе. За счет высокой концентрации анодной плазмы в канале транспортировки, превышающей в 10^2 раз концентрацию электронов в пучке, ток пучка в ~ 2 раза превышал предельный ток Пирса нейтрализованного пучка (рис. 36). Полученные результаты позволяют целенаправленно повышать эффективность плазменных источников электронов.