

УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С $\beta \sim 1$ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ

А.М.Житлухин, В.М.Сафронов, В.В.Сиднев, Ю.В.Скворцов

Экспериментально продемонстрирована возможность эффективного удержания высокотемпературной плазмы с $\beta \sim 1$ в газодинамической ловушке (ГДЛ).

В качестве возможного варианта термоядерного реактора в ¹ предложено использовать ГДЛ, представляющую собой пробкотрон длиной $L_{\text{л}} > \lambda \ln K/K$ (λ – длина свободного пробега частиц, $K = H_{\text{пр}}/H_{\text{л}}$ – пробочное отношение). В отличие от классического пробкотрона с $L_{\text{л}} \ll \lambda \ln K/K$ время удержания в ГДЛ не подвержено существенному влиянию конусных неустойчивостей и увеличивается с ростом K линейно, а не логарифмически. Наличие плазмы с $\beta \sim 1$ приводит к уменьшению поля в центре ловушки и, соответственно, к повышению эффективного пробочного отношения. Для достижения максимального времени удержания необходимо увеличивать β до предельно допустимых значений. Однако вопрос об устойчивости плазмы с $\beta \sim 1$ в ГДЛ до сих пор не исследовался. Наличие областей с неблагоприятной кривизной силовых линий может привести к развитию желобковой неустойчивости или возникновению баллонных мод и вызвать быстрое разрушение плазменного образования.

В настоящей работе экспериментально исследовалось удержание высокотемпературной деи-териевой плазмы с $\beta \sim 1$ в ГДЛ.

Высокотемпературная плазма в ловушке создавалась столкновением потоков, генерируемых электродинамическими ускорителями. Возможность получения высокотемпературной плазмы при столкновении сгустков в продольном однородном магнитном поле в условиях, когда кулоновская длина торможения значительно превышала продольные размеры сгустков, показана теоретически в ² и экспериментально в ³. Эффективная термализация на-

правленной энергии сгустков в этом случае обеспечивалась развитием штанговой неустойчивости. Время жизни горячей плазмы в продольном однородном магнитном поле при обеспечении поперечной термозоляции не зависело от напряженности поля и определялось временем продольного растекания.

Эксперименты по удержанию плазмы в ГДЛ проводились на экспериментальном комплексе 2МК-200, представляющем собой два электродинамических ускорителя с импульсным напуском газа, установленных на расстоянии 7 м навстречу друг другу. Ускорители запитывались от конденсаторных батарей емкостью 1150 мкФ. Рабочее напряжение в эксперименте составляло 20 кВ. Камеры ускорителей соединялись тонкостенным металлическим плазмопроводом диаметром 30 см, в котором с помощью многovitковых соленоидов создавалось квазистационарное профилированное магнитное поле. Конфигурация магнитного поля представляла собой аксиально-симметричную ловушку пробочной конфигурации длиной 2 м (рис.1) с напряженностью поля в пробках $H_{пр}^{(0)} = 14,4$ кЭ. От ускорителя до ловушки плазменные потоки транспортировались в однородном продольном магнитном поле напряженностью 7,2 кЭ на расстояние 2,5 м и инжектировались в ловушку через магнитные пробки. При взаимодействии с магнитным полем пробки наблюдалось частичное отражение потока и эффективность инжекции составляла $\sim 50\%$. Напряженность поля в центре ловушки $H_{л}^{(0)}$ варьировалась от 0 до 12,6 кЭ, а в пробках оставалась неизменной. Это позволило исследовать эффективность удержания плазмы в зависимости от пробочного отношения $K^{(0)} = H_{пр}^{(0)} / H_{л}^{(0)}$ при постоянном энергосодержании плазмы в ловушке.

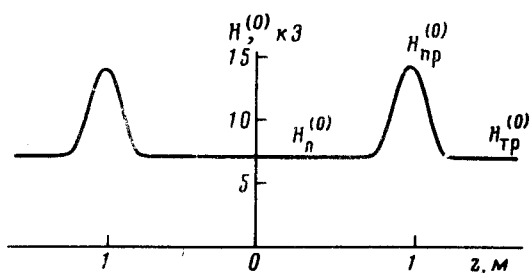
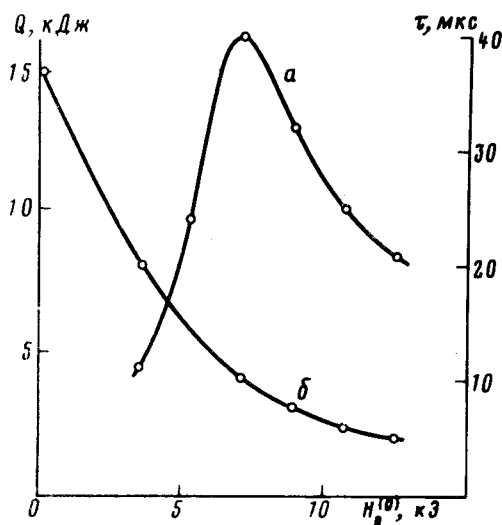


Рис.1. Распределение поля в ловушке

Рис.2. Зависимость времени жизни a и поперечных энергетических потерь b плазмы от магнитного поля $H_{л}^{(0)}$



В результате столкновения потоков в ловушке образовывалась плазма с температурой $T_i \approx 2$ кэВ, погонной плотностью $N \approx 1,5 \cdot 10^{17}$ см $^{-1}$, энергосодержанием $W \approx 15$ кДж. Величина

$$\beta = \frac{P}{P + H_i^2 / 8\pi},$$

(P — давление плазмы, H_i — внутреннее поле) была близка к единице. Рассматриваемая ловушка являлась газодинамической, так как эффективная длина рассеяния ионов вследствие развитой турбулентности была меньше продольных размеров ловушки^{2,3}.

На рис.2, a приведена зависимость времени удержания плазмы от $H_{л}^{(0)}$. Максимальное время удержания составляло $\tau = 40$ мкс. Для сравнения следует отметить, что при столкновении потоков в однородном поле τ не превышало 18 мкс³. Этот факт свидетельствует об эффективной работе ловушки при данных параметрах плазмы.

Время жизни плазмы зависело от времени продольного и поперечного удержания.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\perp}} + \frac{1}{\tau_{\parallel}}.$$

При малых $H_{\perp}^{(0)}$ величина τ определялась мощностью поперечных энергетических потерь. С ростом $H_{\perp}^{(0)}$ и улучшением магнитной термоизоляции поперечные потери Q монотонно падали (рис.2, б). Однако уменьшение пробочного отношения $H_{\text{пр}}/H_{\perp}$ приводило к снижению эффективности удержания за счет ухода частиц вдоль поля. Максимальное время жизни достигалось при $K^{(0)} = 2$, когда $\tau_{\parallel} \sim \tau_{\perp}$. В этом случае реальное пробочное отношение, измеренное при наличии плазмы в ловушке, составляло $K = 6$. Видно, что полученное время удержания соответствовало оценке ¹. $\tau = KL_{\perp}/v_T \approx 30$ мкс.

В результате проделанной работы экспериментально продемонстрирована возможность удержания плазмы с $\beta \sim 1$ в ГДЛ. Получена плазма с $n \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ с $T_i \approx 2$ кэВ. При этом не зарегистрировано каких-либо крупномасштабных неустойчивостей, приводящих к быстрому разрушению плазменного образования.

Литература

1. Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Вопросы атомной науки и техники, Серия: Термоядерный синтез, 1980, вып.1 (5), с.57.
2. Алипченков В.М., Конкашбаев И.К., Лопатко В.Б. Препринт ИАЭ – 3793, 1983.
3. Житлухин А.М., Илюшин И.В., Сафранов В.М., Скворцов Ю.В. Физика плазмы, 1982, 8, 509.

Поступила в редакцию

10 января 1984 г.