

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОБОЧНАЯ ЛОВУШКА

(“Диплодок”¹⁾)

А.И.Морозов

Показана возможность увеличить времена жизни частиц и энергии в пробочной ловушке, если использовать “бегущие” пробки.

1. Введение. Основными недостатками пробочных ловушек Будкера считается малое время удержания частиц, которое ограничено временем ион-ионных столкновений¹. Это реально не позволяет создать экономически выгодный термоядерный реактор. В то же время трудности, связанные с неустойчивостями, как показал М.С.Иоффе с сотрудниками и другие, по-видимому, могут быть преодолены².

Существенный шаг на пути увеличения времени жизни основной массы частиц был сделан Г.И.Димовым с сотрудниками, предложившими “амбиполярную” ловушку. Однако переход к амбиполярной ловушке далеко не единственный способ ослабить вредную роль столкновений в пробочных ловушках с редкими столкновениями. Здесь есть два основных пути, комбинация которых может увеличить $n\tau_E^{3\Phi}$ в 5–10 раз.

Первый из них связан с созданием экономичных инжекторов и рекуператоров (систем прямого преобразования) энергии частиц, покидающих ловушку. Пусть \mathcal{E}_i – энергия ионов, поступающих в ловушку, КПД инжектора – η_i , КПД рекуперации энергии заряженных частиц (ионов, электронов, продуктов реакции) – η_p , КПД теплового цикла – η_T . Тогда условие самоподдержания реакции примет вид

$$\frac{n}{\tau_E} \left[\frac{\mathcal{E}_i}{\eta_i} - \mathcal{E}_i \eta_p - (\mathcal{E}_i - \mathcal{E}') \eta_T \right] = n^2 \langle \sigma_{яд} v \rangle [(W_h + W_\gamma) \eta_T + W_3 \eta_p]. \quad (1)$$

Здесь W_h , W_γ , W_3 – энергии продуктов реакции: нейтронов, излучения, заряженных частиц. Из

¹⁾ Динамическая плазменная ловушка двухкамерная.

ведет к отбору энергии от частиц и существенному падению их плотности. Если не компенсировать уменьшение ε_i и n наращиванием магнитного поля в первой ступени, то ловушка скоро выйдет из рабочего режима. Однако рост H ограничен значением ~ 100 кЭ. Кроме того, слишком большим временем удержания ($\tau \gg \tau_H$) будут препятствовать "близкие" кулоновские столкновения, которые будут забрасывать частицы непосредственно в конус потерь. Разумеется, реальный выбор степени расширения может быть сделан только после соответствующих расчетов на основе уравнения Ландау.

3. Вторая ступень "Диплодока" (рекуператор). Эффективную рекуперацию можно осуществить с помощью второй пробочной ловушки существенно большего диаметра, соединенной через указанную выше подвижную пробку с первой (рабочей) ловушкой (рис.). Расширение магнитного поля приводит к нужной нам перекачке. Вторая (правая на рис.) пробка рекуперирующей ловушки также подвижна, но поле на ее оси, вообще говоря, больше, чем поле в пробке рабочей секции.

Наполнение рекуперирующей ловушки может идти как за счет просачивания частиц через пробку из рабочей ловушки, так и — если это окажется более выгодным — путем сброса в некий момент основной массы частиц благодаря резкому ослаблению поля подвижной "промежуточной" пробки.

Когда рекуперирующая ловушка заполнится в оптимальной степени плазмой, "правая" пробка-поршень (рис.) начнет двигаться и продольная энергия частиц будет передаваться поршню, превращаясь в электроэнергию. КПД такого рекуператора оценивается просто. Если радиус рабочей ловушки a_1 , радиус рекуперирующей — a_2 , то поперечная энергия при адиабатическом расширении уменьшится в $N_{\perp} \approx a_2^2/a_1^2$ раз. При последующем удлинении вторичного объема от L_1 до L_2 продольная энергия уменьшится в $N_{\parallel} \approx L_2^2/L_1^2$ раз. Отсюда видно, что КПД рекуператора будет

$$\eta_p \approx 1 - \frac{1}{N_{\perp}} + \frac{1}{N_{\parallel}}.$$

Полагая $a_2/a_1 = 5$: $L_2/L_1 = 5$, получим $\eta_p = 90\%$.

Следует подчеркнуть, что рассмотренный динамический рекуператор имеет одинаковый КПД и для "рабочего вещества" и для заряженных продуктов реакции в отличие от статических рекуператоров Поста и др.

Отметим также, что в ¹ Г.И.Будкер много внимания уделил периодическим режимам работы пробкотрона и в том числе проблеме рекуперации энергии, но его схемы и акценты отличались от наших. В принципе, предлагаемый нами рекуператор является достаточно универсальной системой и может быть использован, например, в диверторных трактах токамаков и стеллараторов.

Пользуясь случаем, я благодарю В.М.Глаголева, Г.И.Димова, М.С.Иоффе, В.П.Пастухова, А.В.Тимофеева, В.Д.Шафранова за доброжелательное обсуждение работы и конструктивные замечания.

Литература

1. *Будкер Г.И.* В сб.: Физика плазмы и проблемы управляемого синтеза. М.: Изд. АН СССР, 1959, 3, 3.
2. *Панов Д.А.* В сб.: Итоги науки и техники. М.: Изд. ВИНИТИ, 1988, 8, 5.