

Физика открытых ловушек (продольные потери)

Д. И. Сковородин

- Удержание частиц в пробкотроне.
- Амбиполярность потерь. Электрический потенциал.
- Влияние запробочных областей (расширители).
- Ловушки с улучшенным удержанием:
 - Амбиполярная ловушка.
 - Газодинамическая ловушка.
 - Многопробочная ловушка.

Удержание отдельных частиц в пробкотроне Будкера-Поста

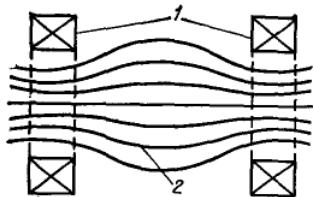


Рис. 1. Магнитная конфигурация простой пробочной ловушки:
1 — катушки с током; 2 — силовые линии

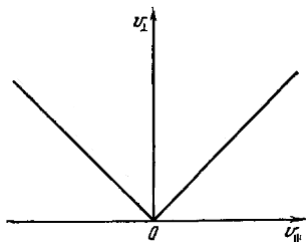
$$\mu = \frac{mV_{\perp}^2}{2B(s)} = const$$

$$E = \frac{mV_{\parallel}^2}{2} + \frac{mV_{\perp}^2}{2} = const$$

$$\frac{mV_{\parallel}^2}{2} + \mu \cdot B(s) = const$$

Эффективный потенциал Юшманова
 $\mu \cdot B(s) + q\varphi$ Условие удержания:

$$\frac{mV_{\parallel}^2}{2} - \frac{mV_{\perp}^2}{2}(R - 1) = 0, \quad R = \frac{B_{max}}{B_{min}}$$



Ионы попадают в конус потерь за столкновительное время (формула Будкера):

$$\tau \sim \tau_i \cdot \ln R$$

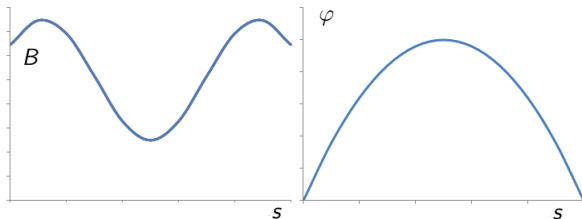
Условие удержания:

$$\sin^2 \theta_L = \frac{1}{R}$$

Оказывается, что этот темп потерь слишком велик, в идеале $Q \sim 1$.

Амбиполярность потерь. Электрический потенциал.

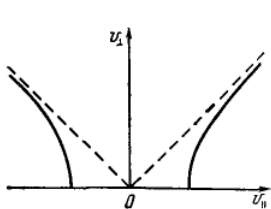
- Частота электронного рассеяния превышает ионную в $\sqrt{m_i/m_e}$ раз (для водородной плазмы ~ 40).
- Так как электроны убегают быстрее, плазма заряжается положительно.
- Амбиполярный потенциал выравнивает потери.



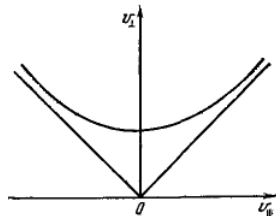
Амбиполярный потенциал

Вместо конуса потерь:

$$\frac{mV_{\parallel}^2}{2} - \frac{mV_{\perp}^2}{2}(R-1) = -\frac{2q\Delta\varphi}{m}$$



Граница области удержания электронов



Граница области удержания ионов

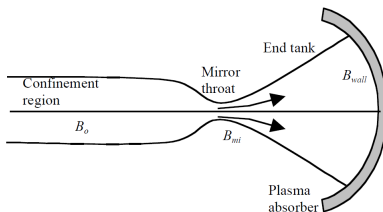
Потери электронов уменьшаются в $\sim \exp(e\Delta\varphi/T_e)$ раз.

Следовательно $(e\Delta\varphi/T_e) \sim \ln\sqrt{m_i/m_e} \sim 3-4$.

Потери энергии на одну ион-электронную пару $5-8T_e$.

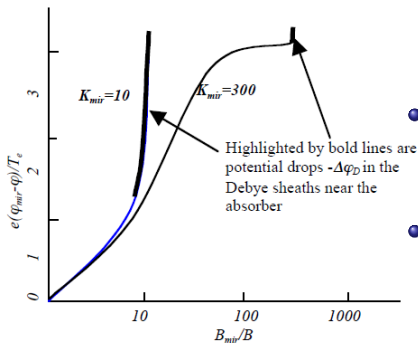
Влияние запробочных областей (расширители)

- Амбиполярность потерь поддерживается только при отсутствии эмиссии электронов со стенки.
- Если холодные электроны попадают в ловушку, то потери горячих электронов могут быть больше ионных. Это приводит к остыванию плазмы.
- Вторичные электроны нужно подавлять.



Вторичные электроны могут запираются пробкой!

Влияние запробочных областей (расширители)



- Обычно, значительная часть перепада потенциала сосредоточена в дебаевском слое на поверхности. Он ускоряет вторичные электроны.
- Между дебаевским скачком и магнитной пробкой есть яма в потенциале Юшманова.
- Накопление запертых электронов приводит к переносу скачка потенциала из дебаевского слоя в объем расширителя при $R_{exp} \gg \sqrt{m_i/m_e}$.

Амбиполярная ловушка

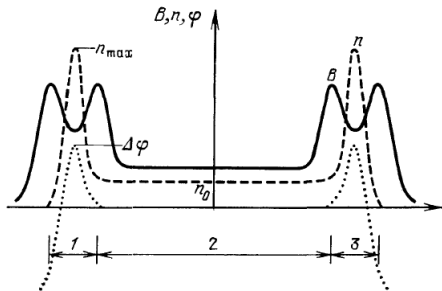


Рис. 11. К объяснению принципа действия амбиполярной ловушки.

Распределение магнитного поля (сплошная линия), плотности плазмы (штриховая линия) и электростатического потенциала (пунктирная линия) вдоль длины установки. Цифрами обозначены центральный (2) и два концевых (1, 3) пробкоутрона

Электроны – бoльцмановские, а плазма – квазинейтральная, поэтому:

$$n_i(s) = n_e(s) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{T_e}\right)$$

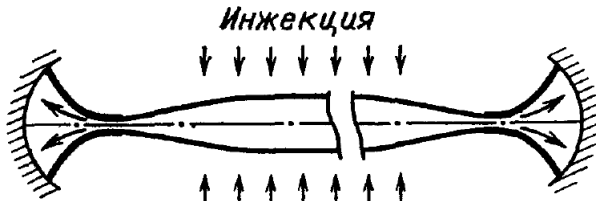
Потенциальный барьер для ионов:

$$\Delta\varphi = T_e \cdot \ln \frac{n_{max}}{n_0}$$

- Общая черта всех адиабатических ловушек – неравновесность функции распределения.
- Микронеустойчивости плазмы могут уменьшать время удержания критически.
- Радикальное решение – удержание столкновительной плазмы с $L/gg\lambda_{ii}/R$.

Два подхода:

- Газодинамическое удержание (ГДЛ).
- Многопробочная ловушка (ГОЛ-3).

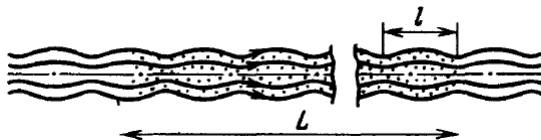


При уменьшении длины свободного пробега потери из пробкотрона Будкера растут. Чем они ограничены?
Если $L/gg\lambda_{ii}/R$, ионы заполняют конус потерь и плазма течет вдоль силовых линий как газ.

$$\frac{nLS_0}{\tau} \approx nV_{Ti}S_{mirror}$$

$$\tau_{\parallel} \approx \frac{L}{V_{Ti}R}$$

Многopробочная ловушка



Если $L > \lambda$, пролётные частицы захватываются в ячейках. При $l < \lambda$ частицы после нескольких осцилляций попадают в пролетную зону, но движутся в случайном направлении. Течение плазмы становится диффузионным.

$$F_{\text{тр}} \sim \frac{m_i n U}{\tau_{ii}} \approx \frac{\partial n T}{\partial z} \sim n T / L$$

$$\tau_{\parallel} \approx \frac{L}{V_{Ti}} \frac{L}{\lambda_{ii}} \sim L^2 - \text{диффузия}$$

В случае сильной гофрировки $R = \frac{B_{max}}{B_{min}} \gg 1$ нужно учесть, что:

- средняя скорость в R раз ниже скорости пролетных ионов;
- время рассеяния в R раз меньше τ_{ij} .

$$\tau_{\parallel} \approx R^2 \frac{L}{V_{Ti}} \frac{L}{\lambda_{ij}}$$

Если $l \gg \lambda_{ij}/R$, то ионы нельзя разделить на запертые и пролетные и течение становится газодинамическим.

Наилучшее удержание – в режиме $l \sim \lambda_{ij}/R$:

$$\tau_{\parallel} \approx R \frac{L}{V_{Ti}} \frac{L}{l}$$