

ВЛИЯНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ НА МГД-УСТОЙЧИВОСТЬ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

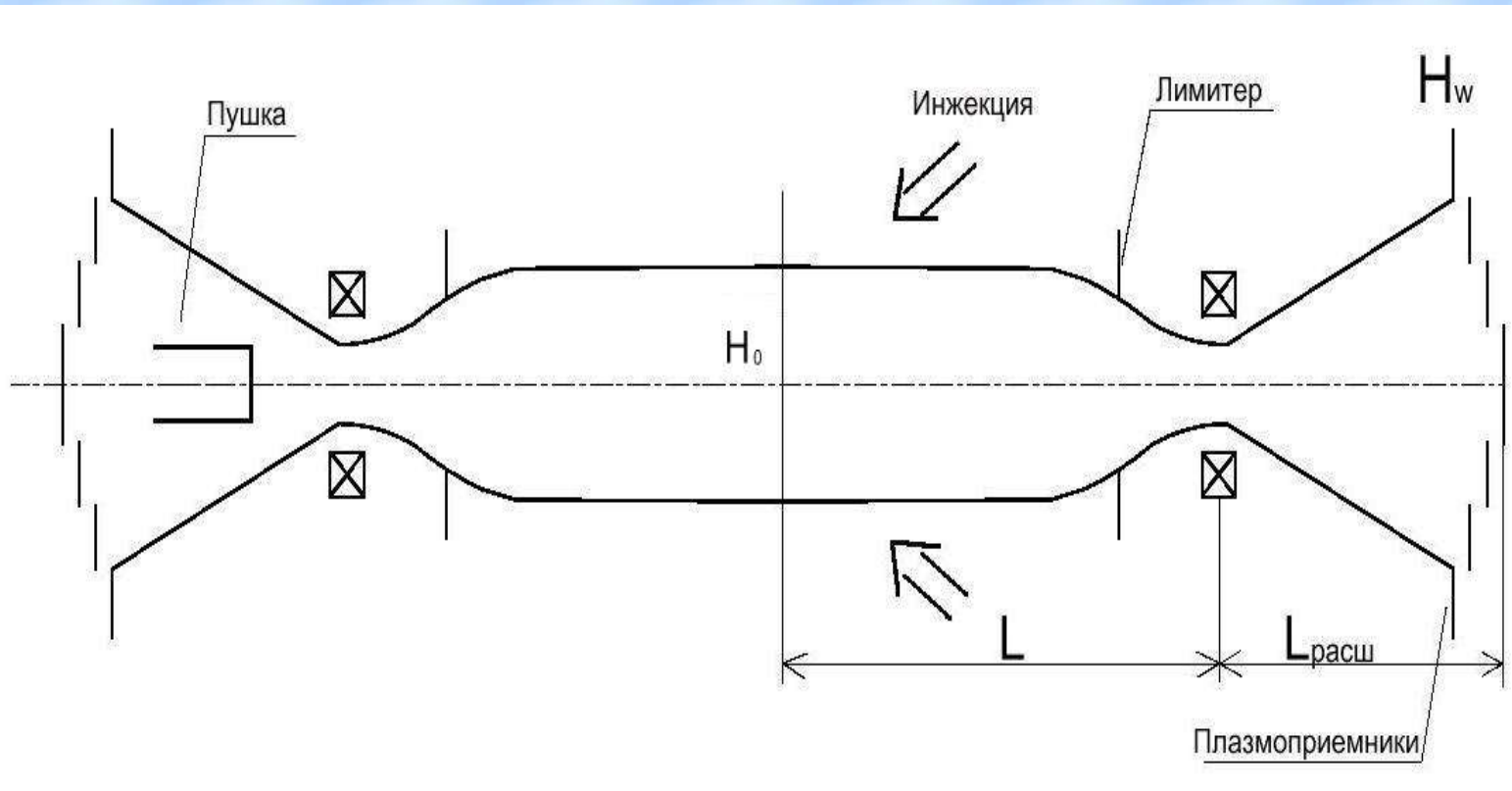
Докладчик: Солдаткина Е.И.

Научный руководитель: Багрянский П.А.

План доклада

- Мотивы для проведения исследований и постановка задачи
- Особенности задачи об МГД-устойчивости плазмы в ГДЛ; факторы, определяющие скорость развития неустойчивости, оценка параметров
- Экспериментальные результаты:
 - Изучение сопротивления дебаевского слоя вблизи лимитера
 - Влияние дифференциального вращения плазмы на МГД-устойчивость
- Выводы

Конфигурация магнитного поля



Параметры:

$$R=25;$$

$$L=3.5 \text{ м};$$

$$L_{\text{расш}}=1 \text{ м}.$$

$$H_0=2 \text{ кГс};$$

$$H_w=0.5 \text{ кГс};$$

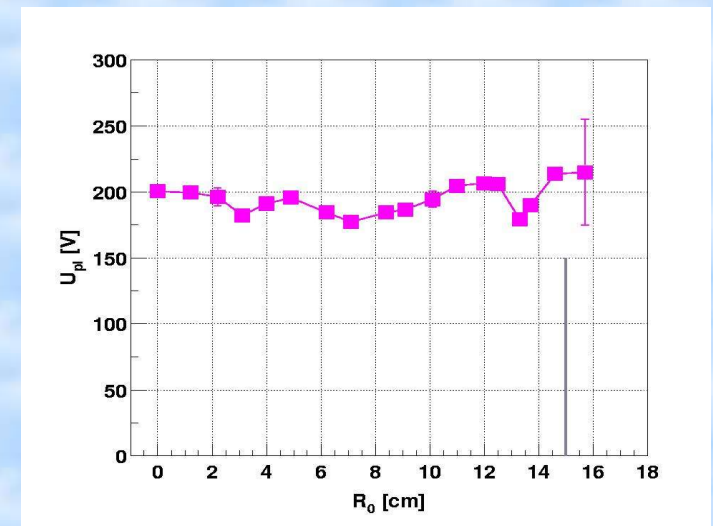
$$n = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3};$$

$$T_e = 55 \text{ эВ}.$$

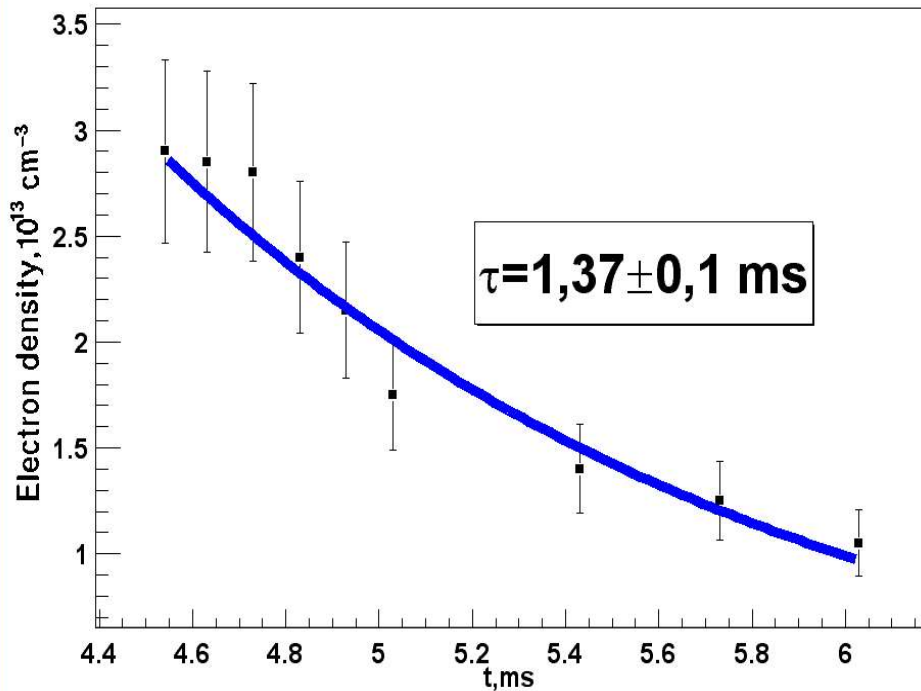
Существенное влияние на устойчивость двухкомпонентной плазмы оказывает радиальное электрическое поле:

$$\frac{\rho_L L}{a^2} \ll \sqrt{\frac{p_{hot}}{p_{warm}}} - \text{радиальное поле несущественно}$$

$$\text{В ГДЛ: } \frac{\rho_L L}{a^2} \sim 2.1, \sqrt{\frac{p_h}{p_w}} \sim 2.2$$



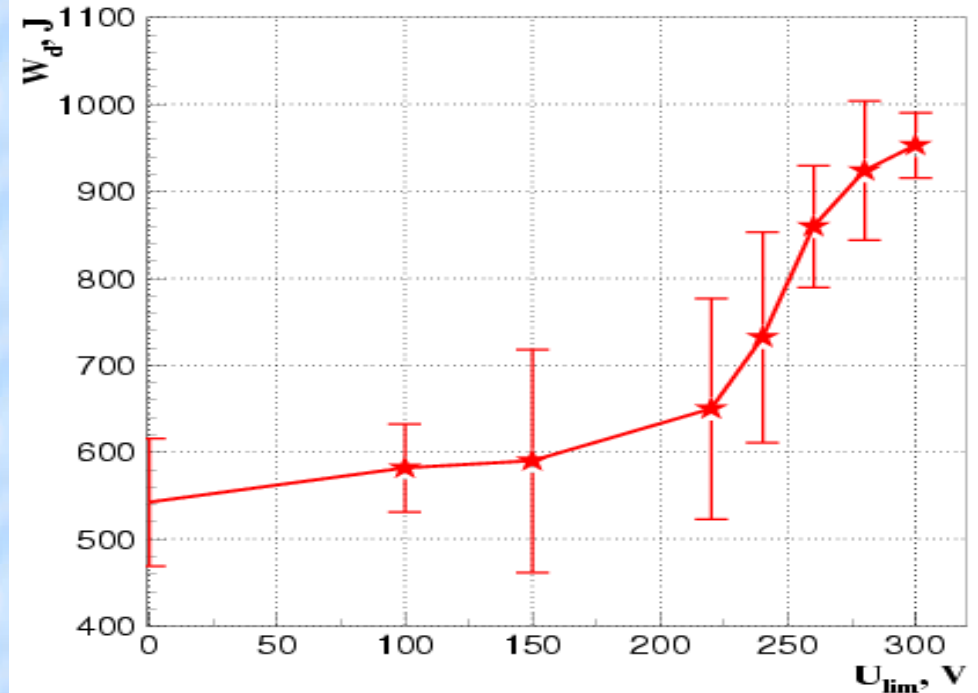
Мотивы для проведения исследований



При оптимальной величине потенциала на лимитерах время жизни частиц теплой плазмы хорошо соответствовало времени газодинамического удержания

$$\tau_{gdt} = (1.38 \pm 0.1) \text{ ms}$$

P.A.Bagryansky, A.A. Lizunov et.al.,
Fus. Sci. and Techn., Vol. 43, №1T,
pp. 152-156.



Особенности задачи об МГД-устойчивости плазмы в газодинамической ловушке

Факторы, влияющие на скорость развития желобковой неустойчивости в ГДЛ:

- Ненулевая плотность плазмы в расширителе;
- Наличие течения плазмы.

Уравнение желобковых колебаний

$$\left[H_0 r_0 \int_{-L}^L \frac{\rho}{H^3 r^2} dl \right] \ddot{\xi}_0 + \left[H_0 r_0 \int_{-L}^L dl \frac{\partial}{\partial l} \frac{\rho V}{H^3 r^2} \right] \dot{\xi}_0 + \left[\int_{-L}^L \frac{dl}{H^2 r} \frac{d}{dr_0} \kappa(2p) \right] \xi_0 = 0.$$

Инерция

Сила трения

Выталкивающая сила

$$\ddot{\xi}_0 + \nu \dot{\xi}_0 + \Omega^2 \xi_0 = 0$$

Нагорный В.П., Рютов Д.Д., Ступаков Г.В.,
Желобковая неустойчивость плазмы в
газодинамической ловушке

Решение

$$\Omega = \frac{V_i}{L}, \quad \nu = \frac{H_{np}}{H_{cm}} \frac{1}{R^2} \frac{V_i}{L} = \frac{1}{R} \frac{L}{V_i} \frac{H_0}{H_{cm}} = \frac{1}{\tau_{GDT}} \frac{H_0}{H_{cm}} \approx 0.15 \Omega \quad \omega = -i \frac{\nu}{2} - \sqrt{\frac{-\nu^2}{4} + \Omega^2}$$

$$\frac{m_{эфф.расш}}{m_{эфф.пробк}} \approx 0.015$$

**Влияние выноса импульса
несущественно**

Постановка задачи

Время развития МГД-неустойчивости

$$\tau_{MHD} = \frac{L}{V_i} \sqrt{\frac{W_{target}}{W_{fast}}} \simeq 15 \mu s$$

$$W_{fast} = 300 \text{ Дж}, W_{target} = 60 \text{ Дж}, V_i(60 \text{ эВ}) = 10^7 \text{ см/с}$$

Время разрядки желобка на торец

$$\tau_{rel} = RC$$
$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} = \frac{n m_i c^2 L}{B^2} \simeq 6 \mu F$$

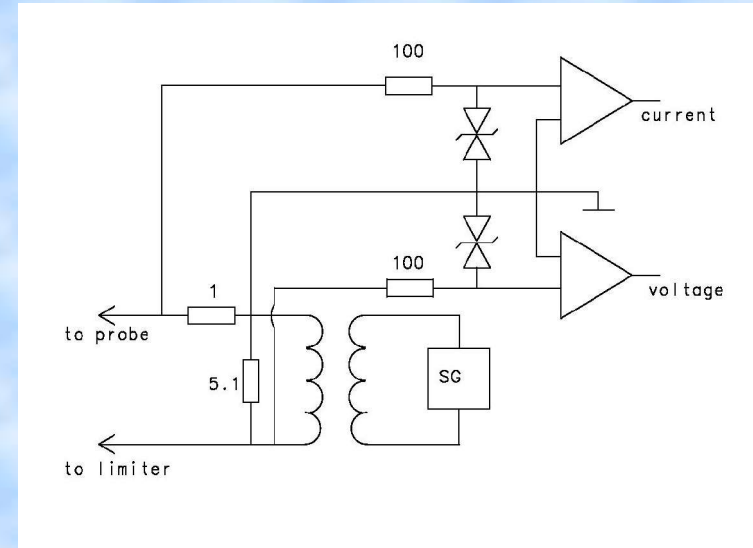
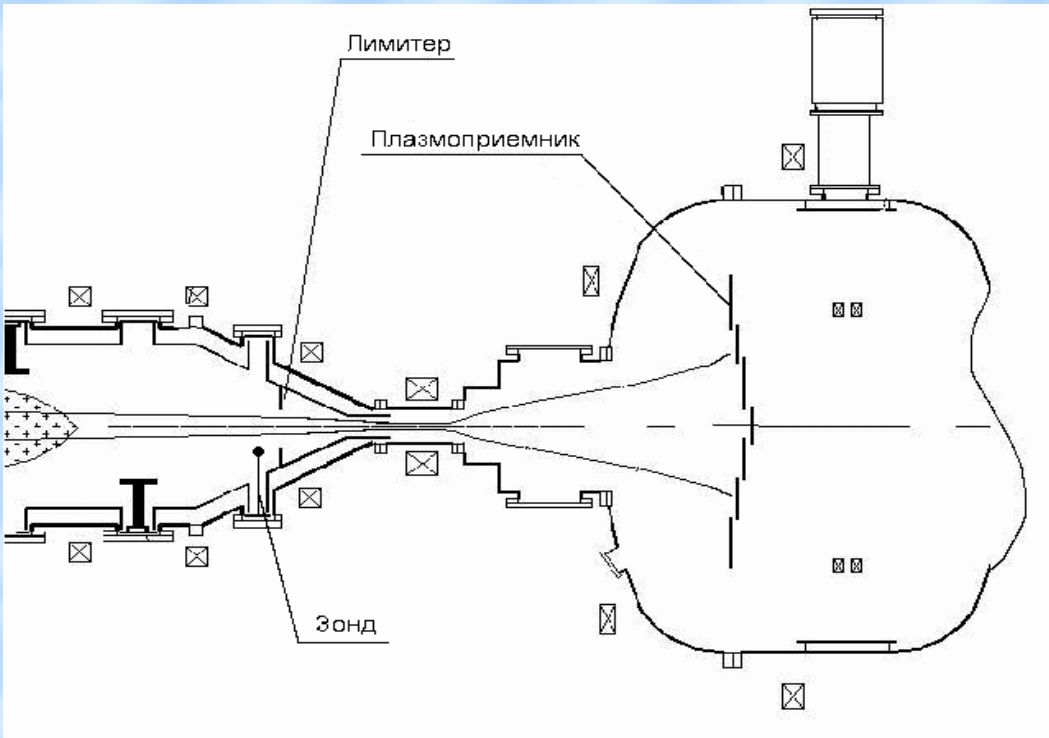
При условии $\tau_{MHD} \gg \tau_{rel}$ - замороженность в торец (либо лимитер)

На установке ТМХ-У (LLNL) наблюдался режим устойчивого удержания плазмы без использования стабилизаторов, объясняемый взаимодействием КЛР-эффекта и «вмороженности» плазмы в лимитеры.

Molvik A.W., Barter J.D., et. al.
Stable operation of an effectively axisymmetric neutral beam driven tandem mirror.
Nuclear Fusion, 1990, Vol.30, P.815.

Задача – измерение сопротивления R дебаевского слоя вблизи лимитера для проверки условия замороженности

Схема эксперимента и результат



Электрическая схема для измерения R

Пробочный узел ГДЛ

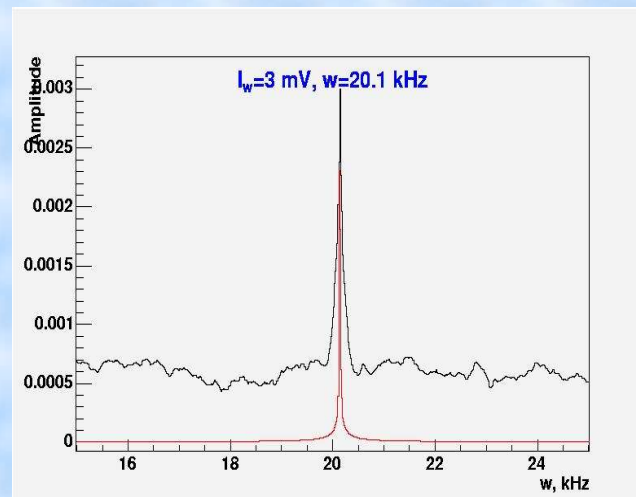
$$R_{exper} = \frac{U}{I}, \quad R_{eff} = R_{exper} \frac{S_{probe}}{S_{ring}},$$

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_{eff_i}},$$

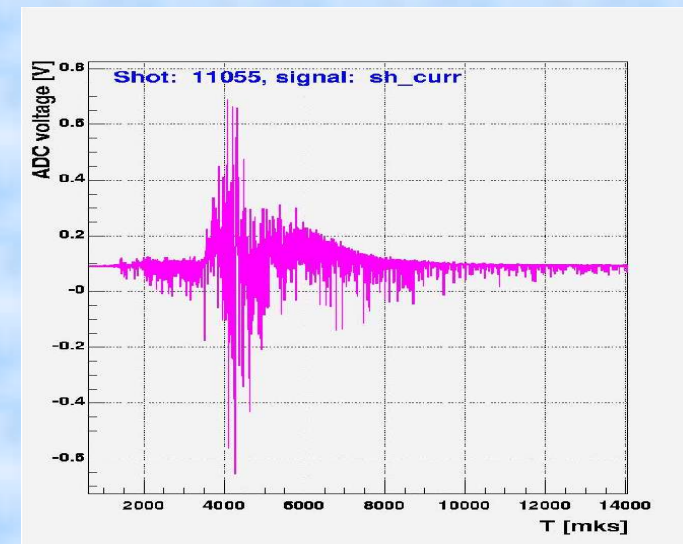
$$R = 8.5 \Omega \rightarrow \tau_{rel} \approx 50 \mu s$$

$$\tau_{MHD} < \tau_{rel}$$

Вмороженности в лимитер нет

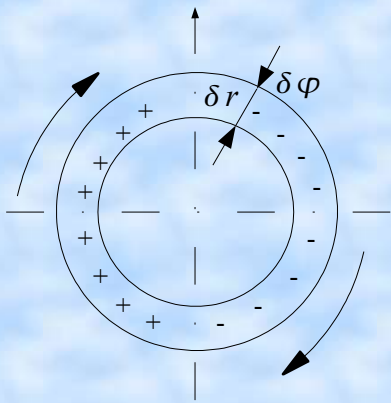


Фурье-фильтрация сигналов



Осциллограмма сигнала тока

Влияние дифференциального вращения плазмы на МГД-устойчивость



При каких электрических полях внешний слой плазмы повернётся относительно внутреннего на 1 оборот за

$$\tau \leq \tau_{MHD}$$

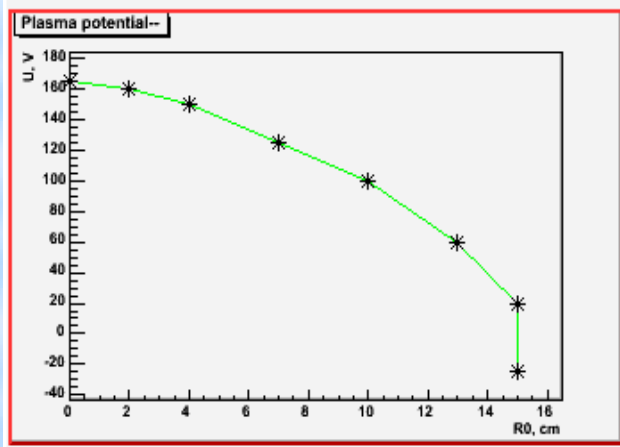
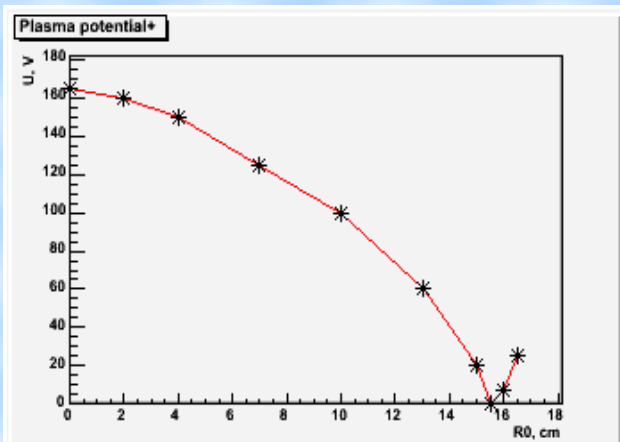
$$V_{dr} = c \frac{E}{B} = c \frac{\delta \varphi}{\delta r} \frac{1}{B} \longrightarrow \tau = \frac{\delta l}{V_{dr}} = \frac{2 \pi \delta r}{c \frac{\delta \varphi}{\delta r} \frac{1}{B}} \leq \tau_{MHD}$$

$$\delta r = 1 \text{ см}, B = 2 \text{ кГс}$$

$$\tau_{MHD} \approx 15 \text{ мкс}$$

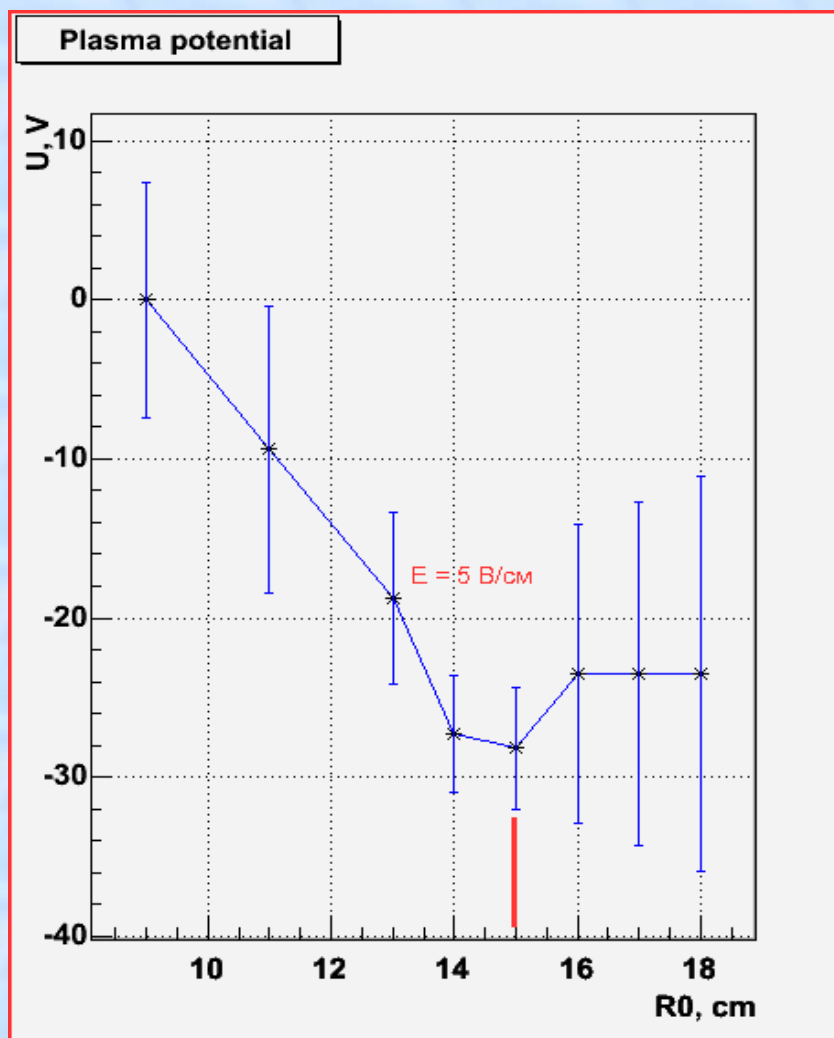
$$\delta \varphi \geq \frac{2 \pi (\delta r)^2 B}{c \tau_{MHD}} \approx 10 \text{ В}$$

$$E \approx 10 \text{ В/см}$$

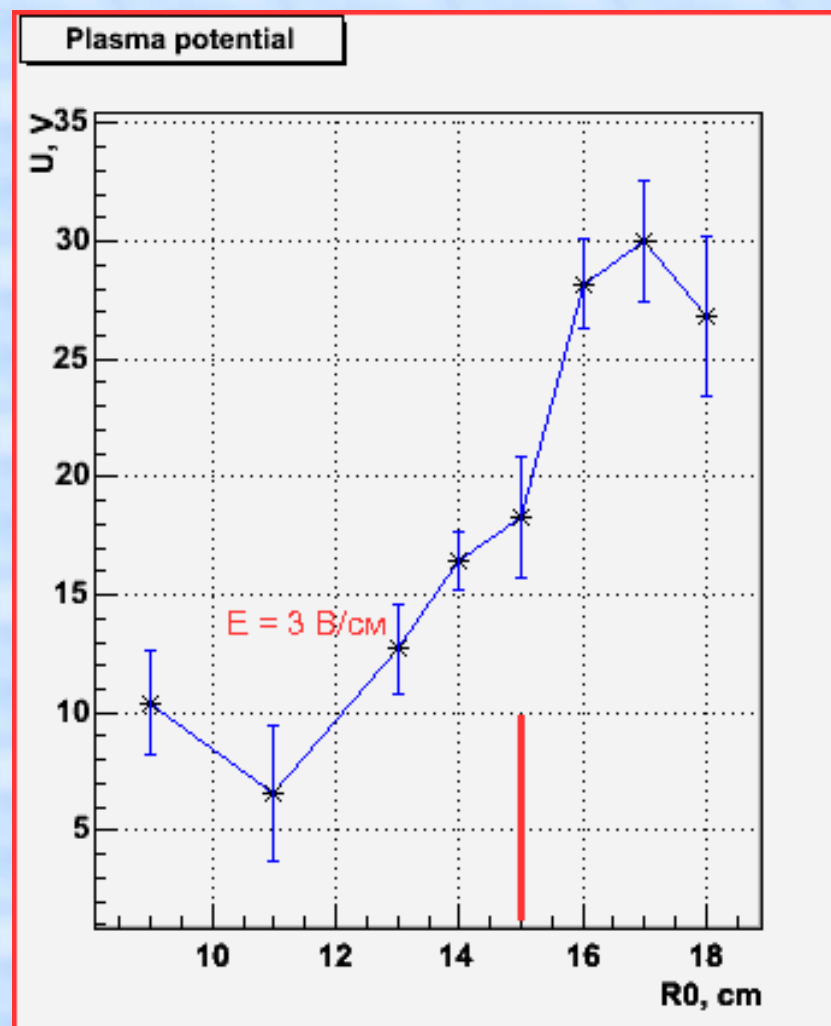


Новая система лимитеров

Радиальные профили потенциала плазмы

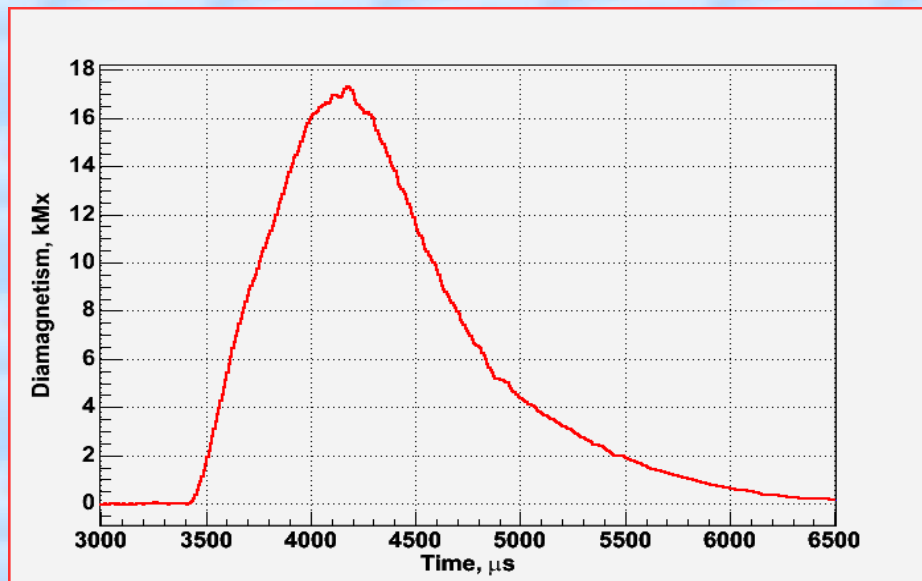


Отрицательное смещение на лимитере (-25 В)

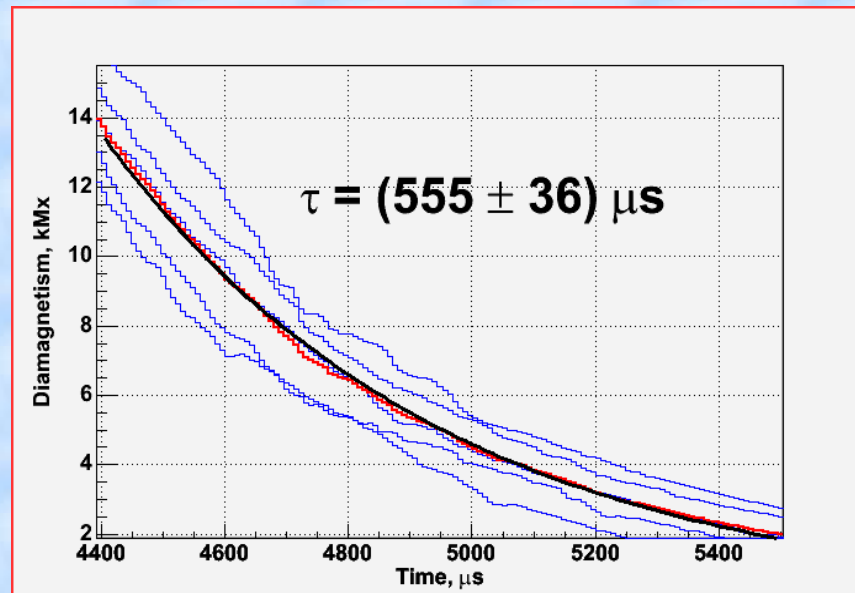


Положительное смещение на лимитере (+25 В)

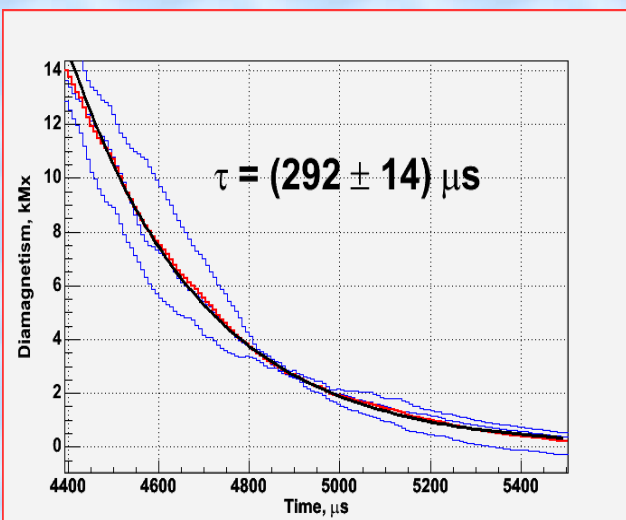
Результаты: сигналы диамагнетизма плазмы в различных режимах



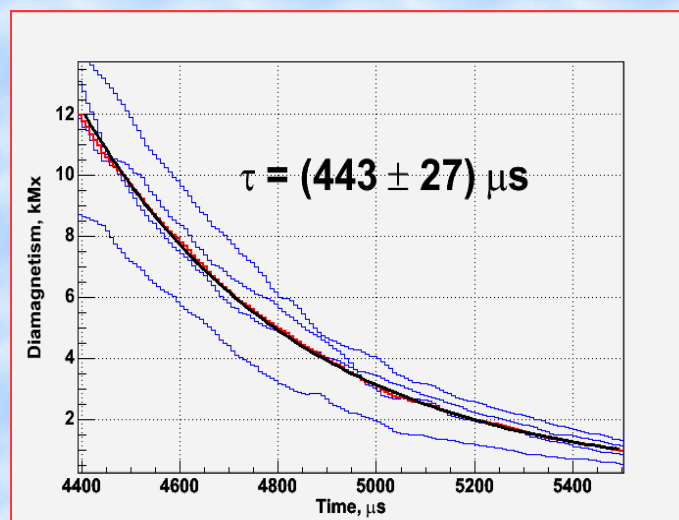
Диамagnetный сигнал от быстрых ионов



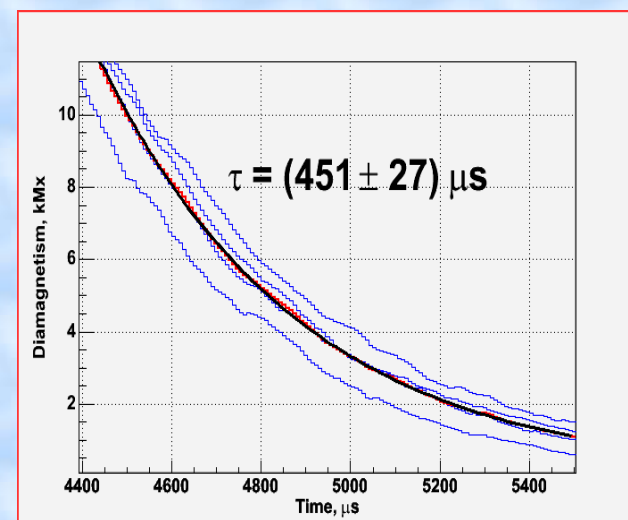
На лимитерах $\approx +120\text{V}$



Лимитеры заземлены



На лимитерах $\approx +25\text{V}$



На лимитерах $\approx -25\text{V}$

Выводы

- Измерено сопротивление дебаевского слоя вблизи радиальных лимитеров на установке ГДЛ.
- Показано, что наблюдаемая МГД-устойчивость в ГДЛ не может быть обеспечена вмороженностью плазмы в радиальные лимитеры, а сопротивление дебаевского слоя вблизи лимитера соответствует случаю отсутствия эмиссии электронов с его поверхности.
- Установлено, что слабое радиальное электрическое поле, сосредоточенное вблизи поверхности плазмы, способно существенно увеличить характерное время жизни плазмы по сравнению со временами жизни в условиях неблагоприятной конфигурации магнитного поля.
- Результаты, полученные в работе, могут быть основой для дальнейшего изучения влияния электрического поля, сосредоточенного в узком радиальном слое на поперечный перенос в открытых системах для магнитного удержания плазмы.