

**Влияние радиального
электрического поля на
МГД-устойчивость плазмы в
газодинамической ловушке**

(по материалам кандидатской диссертации)

Солдаткина Е.И.

Структура диссертации

Введение

I. МГД-устойчивость в ГДЛ: обзор ранее полученных результатов

II. Влияние контакта плазмы с радиальными и торцевыми лимитерами на устойчивость

- Частичная вмороженность в лимитер
- Контакт с торцевым приемником плазмы

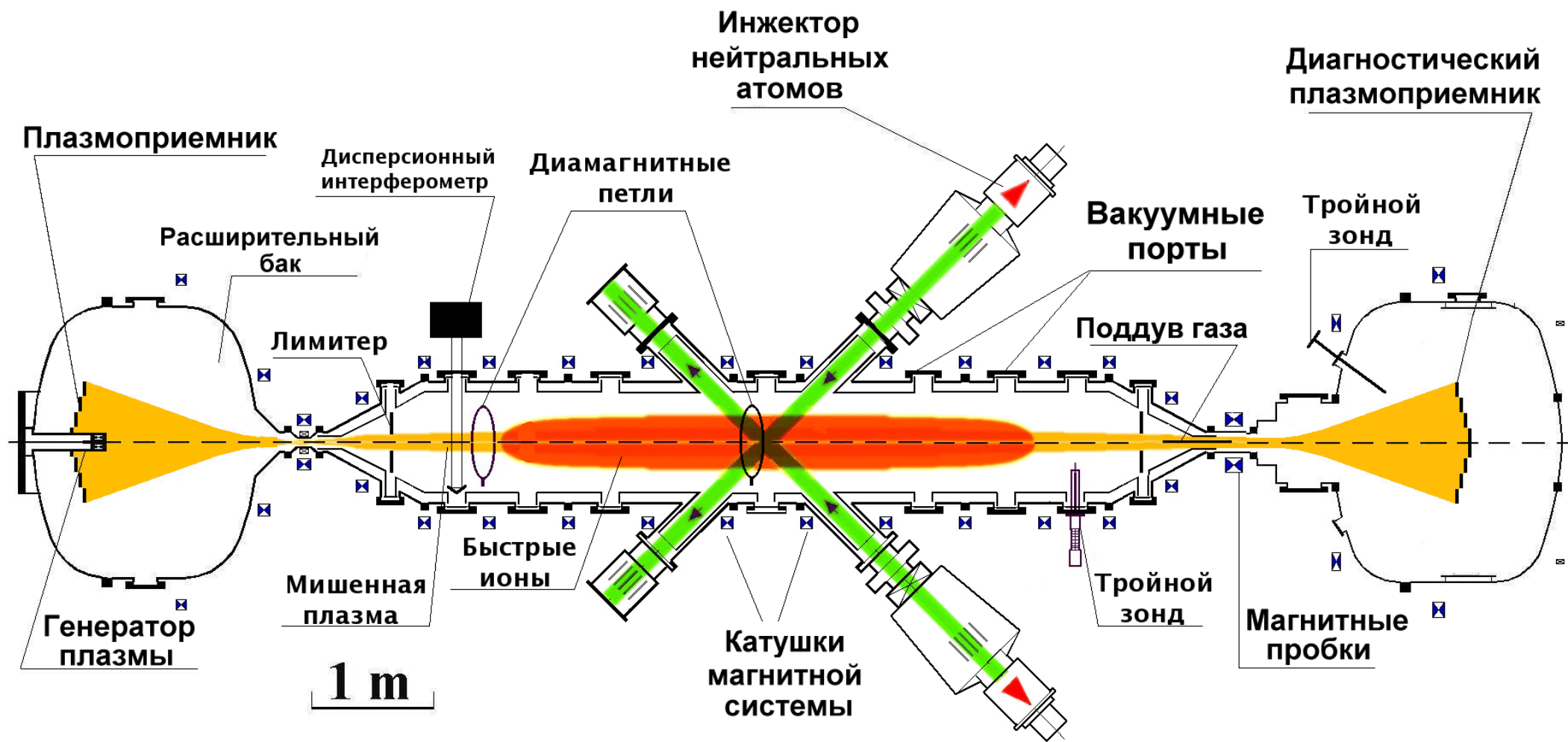
III. Влияние дифференциального вращения на МГД-устойчивость

- Радиальные профили электрического потенциала
- Стабилизация в стационарном режиме удержания
- Измерение поперечных потерь в режимах с дифференциальным вращением
- Теоретическая модель вихревого транспортногo барьера

IV. Стабилизация при помощи «полукаспа»

Выводы работы

Установка ГДЛ



*Параметры на момент
начала исследований*

$R=33$;
 $H_0=2.0$ кГс;

$$n_{warm\ max} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3};$$

$$n_{fast} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3};$$

$$T_e = 70-80 \text{ эВ};$$

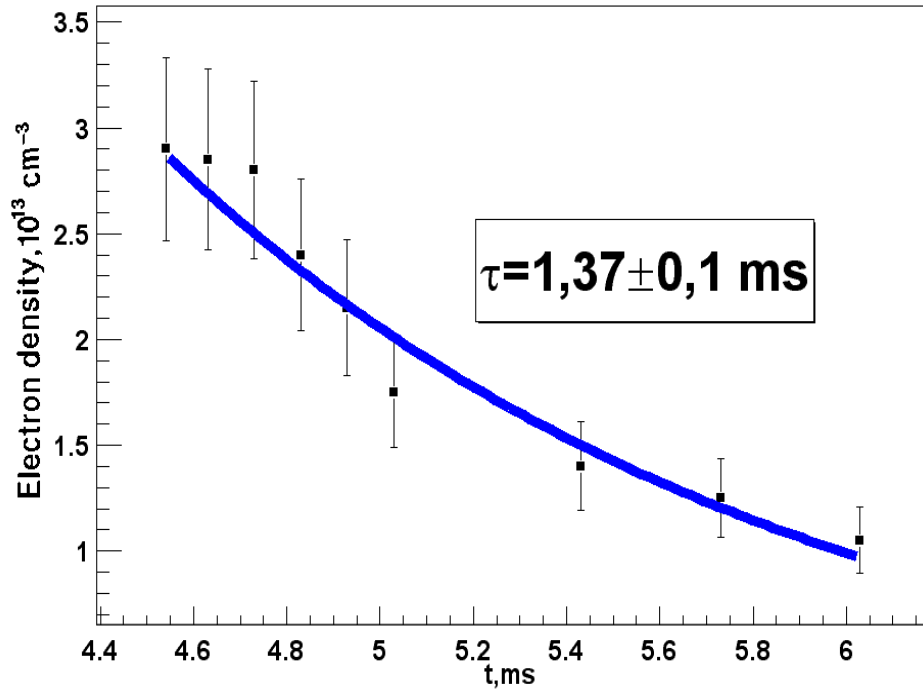
$$\beta \approx 30\%;$$

$$\rho/a = 0.6;$$

$$a = 10 \text{ см}.$$

МГД-устойчивость в ГДЛ: история

Эксперименты по минимизации радиального электрического поля

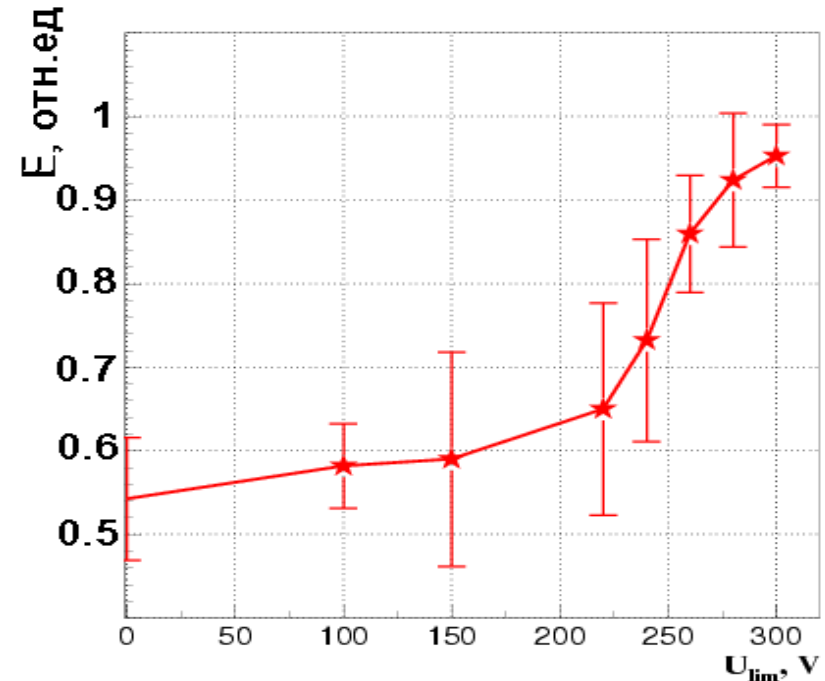


Ход электронной плотности
от времени

Было получено $\beta \approx 40\%$, $T \approx 100 \text{ эВ}$

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

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



Зависимость энергосодержания в быстрых ионах от потенциала на лимитере

Основная цель работы заключалась в том,

чтобы найти объяснение эффекту подавления МГД-неустойчивости, который наблюдался при подаче электрического потенциала на радиальные лимитеры.

Что может влиять на скорость развития желобковой неустойчивости в ГДЛ?

- ★ Ненулевая плотность плазмы в расширителе;
- ★ Наличие течения плазмы;
- ★ Частичная «вмороженность» в радиальные и торцевые лимитеры;
- ★ Дифференциальное вращение плазмы.

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

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

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, Nuclear Fusion,
vol.24 (11), 1984.

Решение

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

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

**Влияние выноса импульса
несущественно**

Проверка гипотезы о вмороженности

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 $\tau_{MHD} \gg \tau_{rel}$ - вмороженность в торец (либо лимитер)

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

Работы по «неидеальной вмороженности»

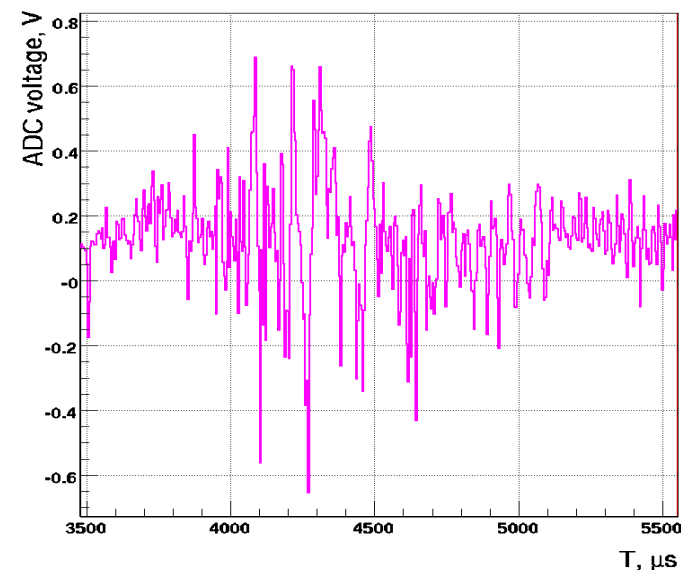
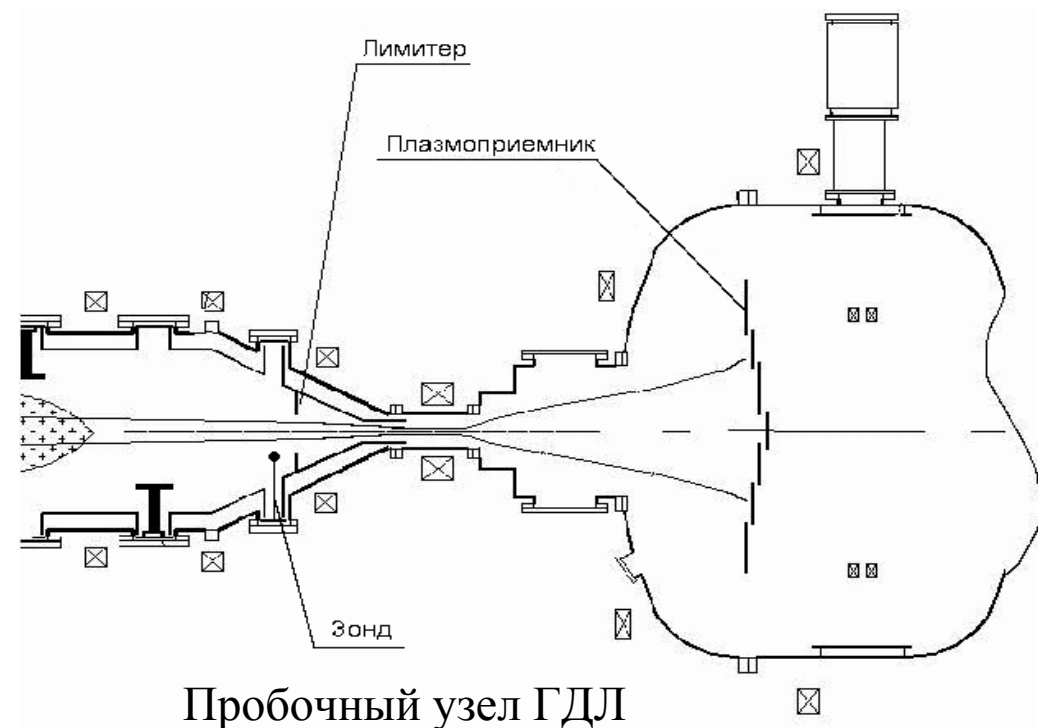
1. Kunkel W.B. et. al. Interchange stabilization by incomplete line-tying, Proc, of 7th ICPIG, 1965, v.II, pp. 702-706.

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

3. Segal D. et. al. Stabilization of flute modes by finite-Larmor-radius and surface effects, Phys. Fluids 25(9), 1982, pp. 1485-1487.

.....

Контакт с лимитером: схема эксперимента и результат



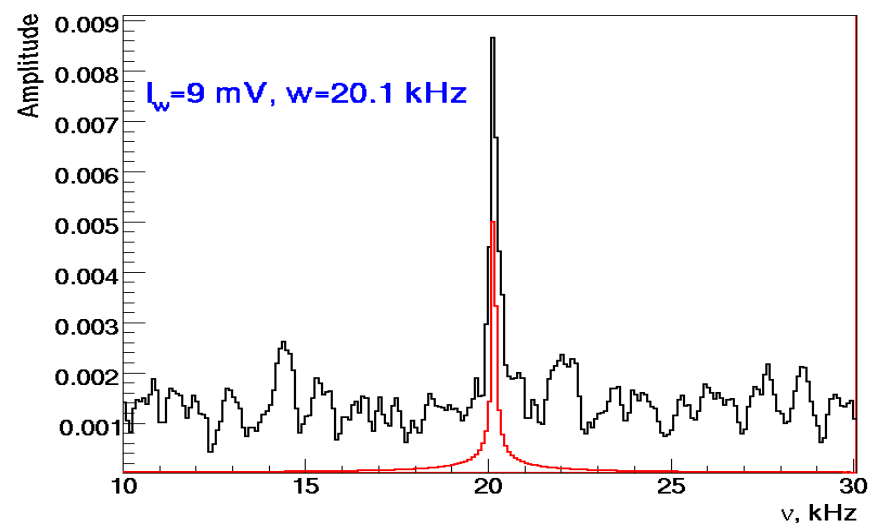
Оциллограмма сигнала тока

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

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

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

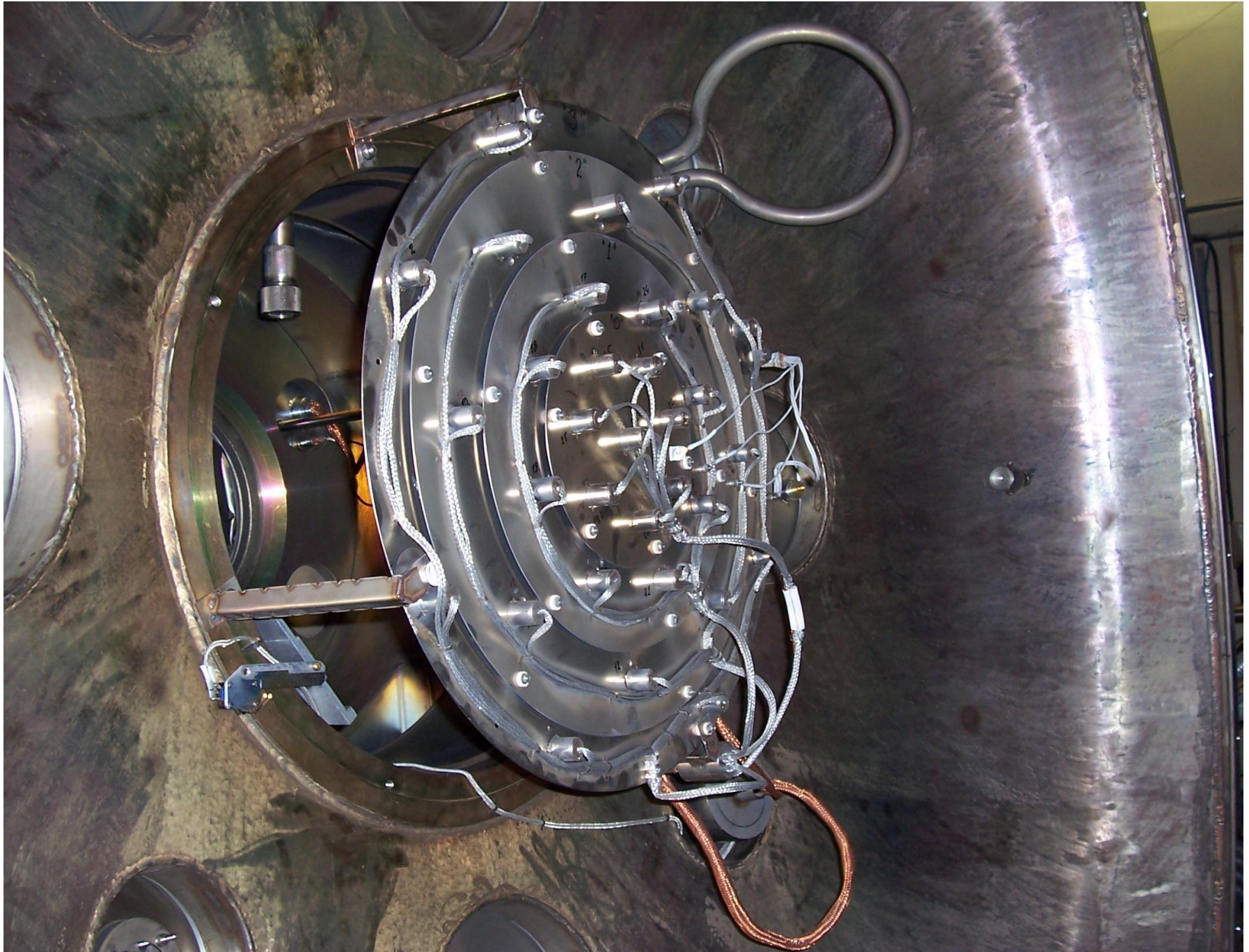
$$\tau_{MHD} < \tau_{rel}$$



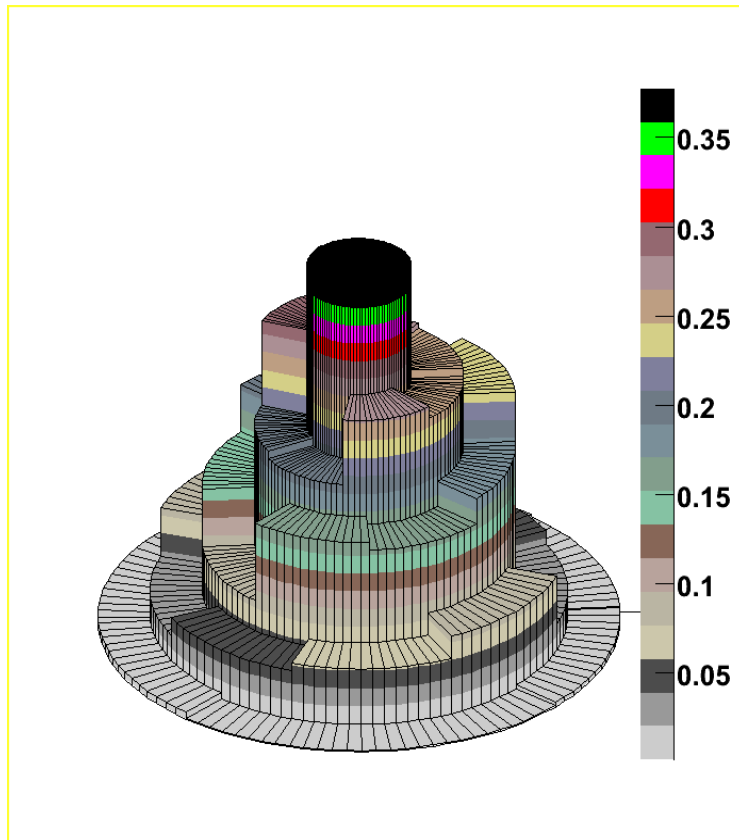
Фурье-спектр сигналов

Вмороженности в лимитер нет

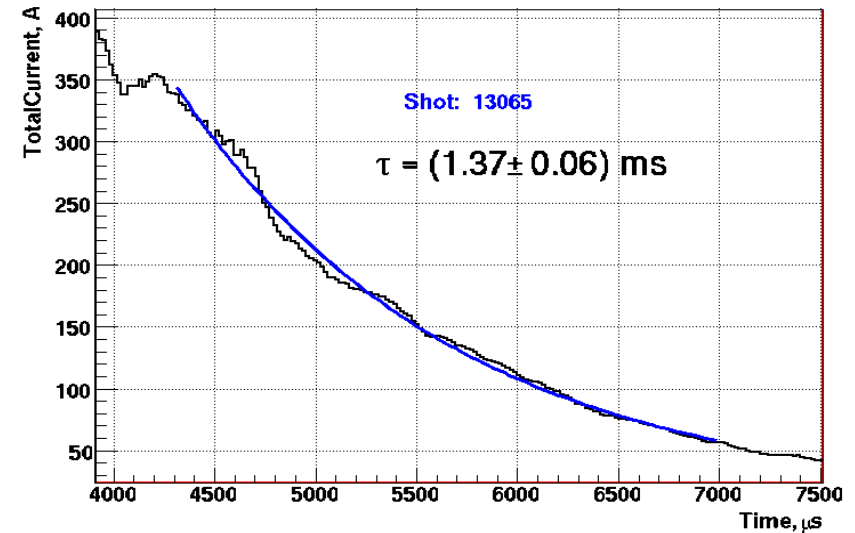
Контакт с торцами (1)



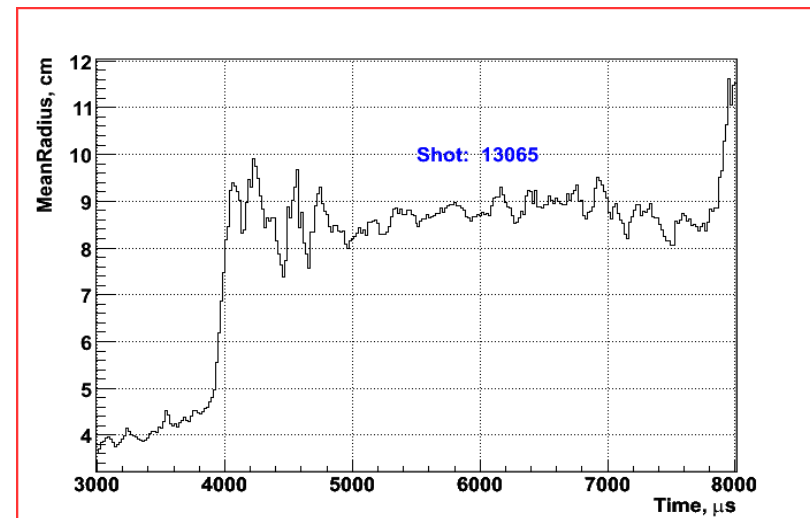
Торцевые плазмодприёмники позволяют...



Визуализация структуры токов на торец

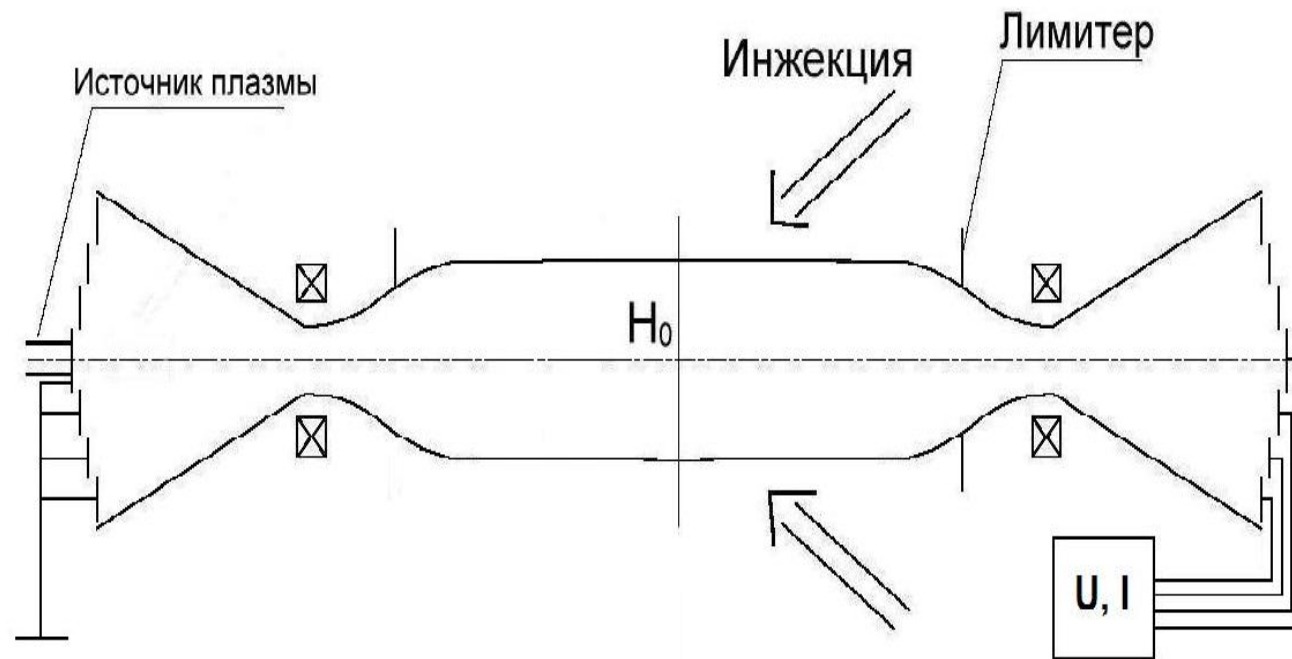


Характер и время распада полного тока на торец



Средний радиус плазмы

Контакт с торцами (2)



$$\tau_{gdt} \approx 1.2 \text{ ms}$$

$$\tau_{MHD} \approx 15 \mu s$$

Тогда время разрядки
плазменного столба на
торец

Непосредственные измерения
сопротивления колец
плазмоприёмников, а также
данные дисперсионного
интерферометра позволили
сделать оценку:

для 1 плазмоприемника $R \approx 0.26 \Omega$

по теории плоского зонда

$$R = \frac{T_e}{I_{oi}} \approx \frac{70 \text{ eV}}{350 \text{ A}} \approx 0.2 \Omega$$

$$R \approx 0.26 \Omega, C \approx 6 \mu F$$

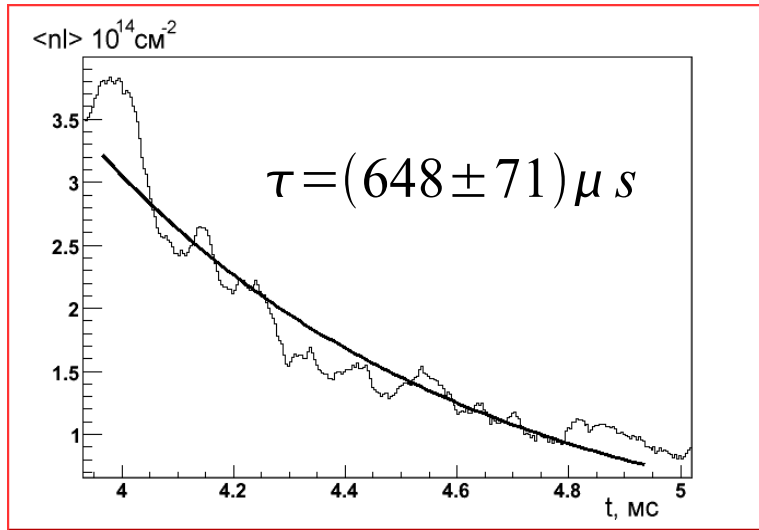
$$\tau_{rel} \approx 1.6 \mu s$$

Контакт с торцом существенен!

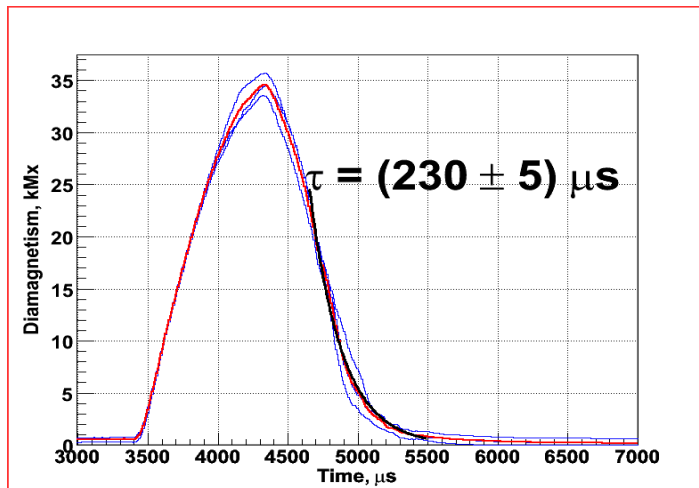
Kunkel W.B. et. al. Interchange stabilization by incomplete line-tying, Proc, of 7th ICPIG, 1965, v.II, pp. 702-706.

Но...

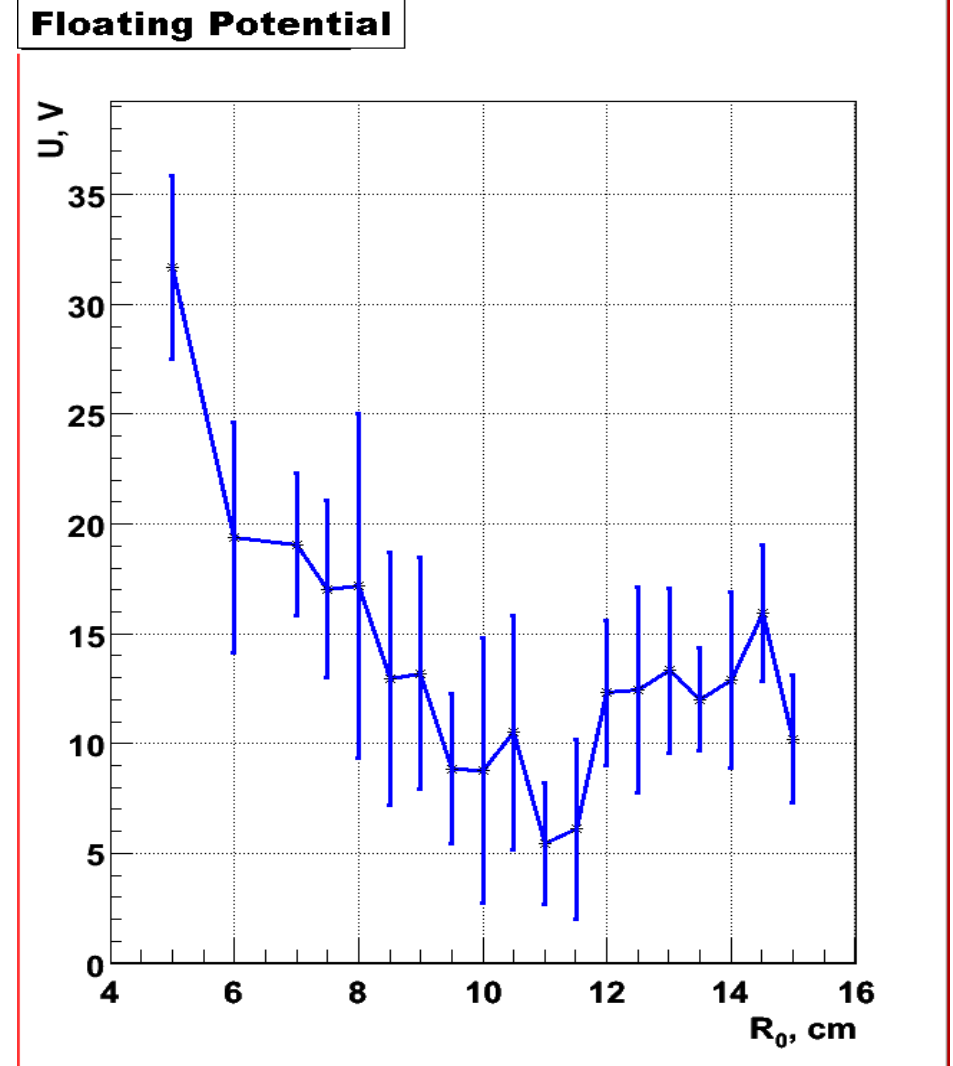
если лимитер и плазмopриёмники заземлены, реализуется
неустойчивый режим удержания



Линейная плотность плазмы



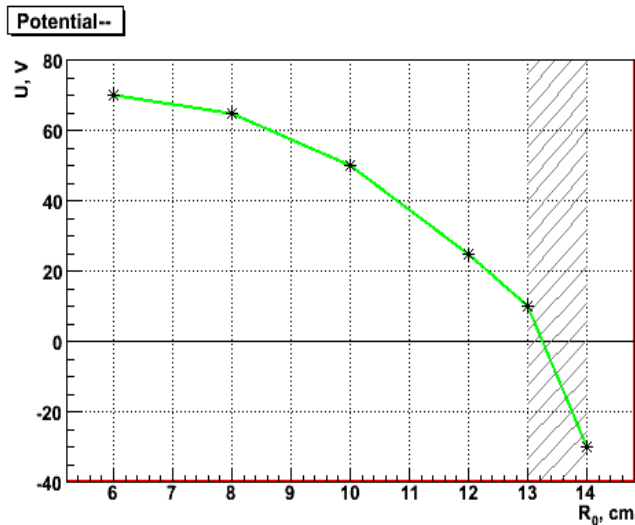
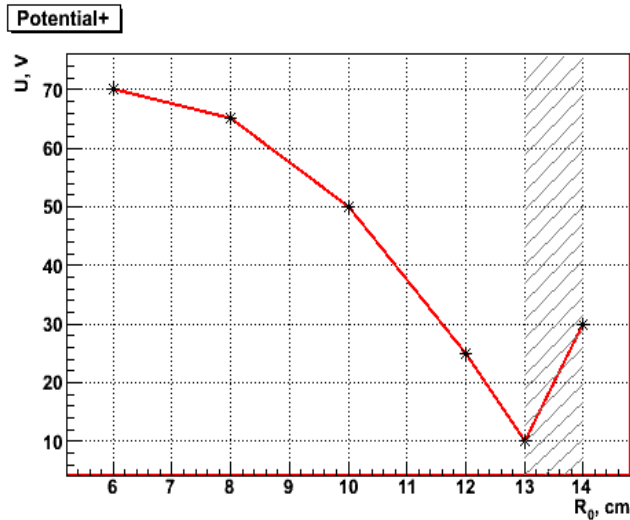
Диамagnитный сигнал быстрых частиц



Потенциал зонда в плазме

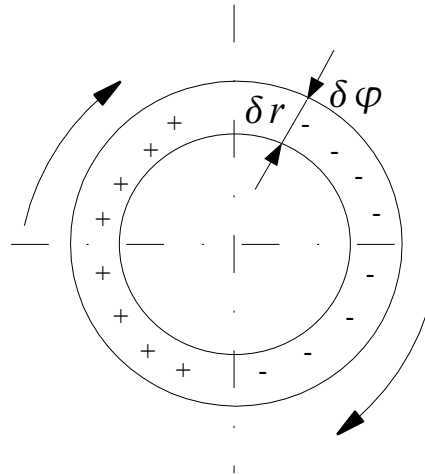
Влияние дифференциального вращения плазмы на МГД-устойчивость

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



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

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



$$\delta r = 1 \text{ cm}, B = 2 \text{ kGc}$$

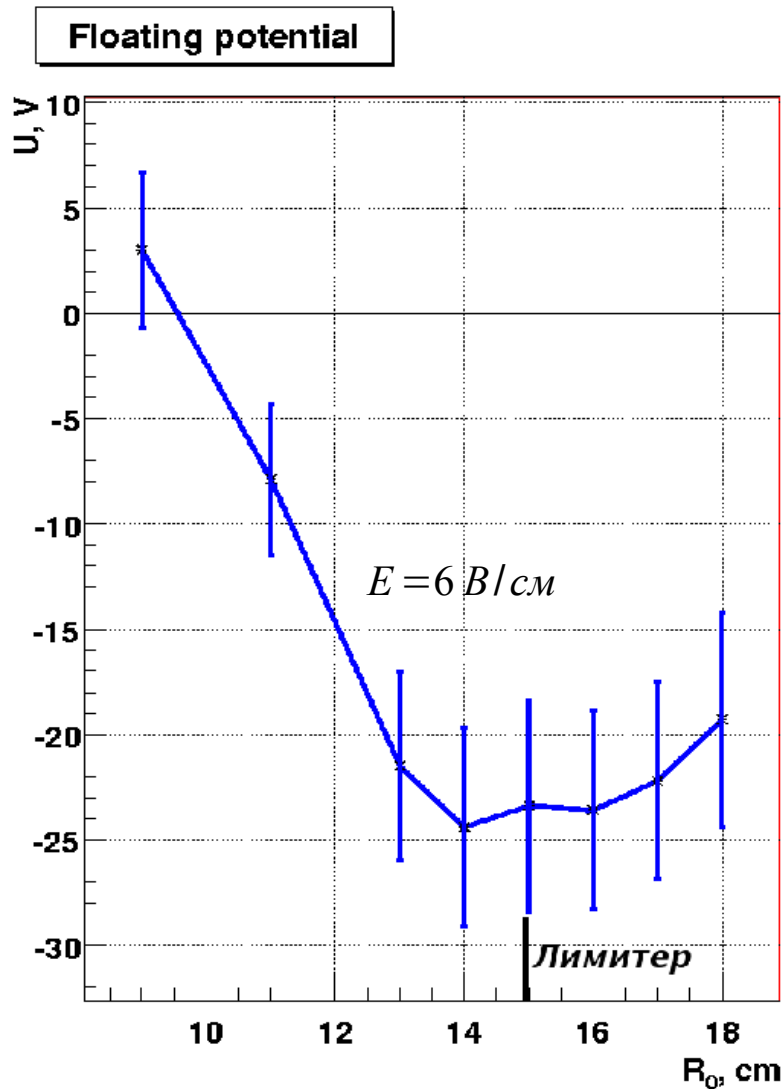
$$\tau_{MHD} \approx 15 \mu s$$

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

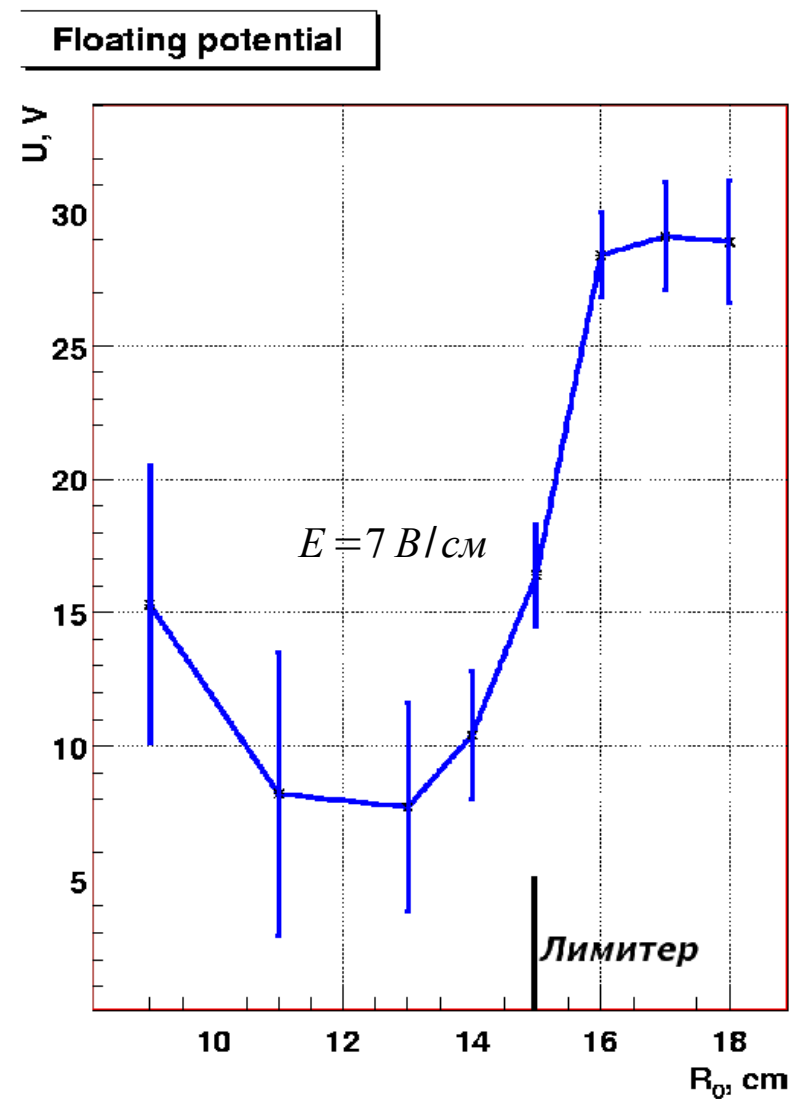
$$E \approx 10 \text{ V/cm}$$

- Богданов Г.Ф. и др. //Ядерный синтез. 1962. Приложение. Т.1.
- Волосов В.И. О некоторых особенностях желобковых колебаний в открытой ловушке с радиальным электрическим полем, ЖТФ 47, №7, 1977 г.
- Mase A. et.al. Ambipolar potential effect on drift-wave mode in Tandem-mirror plasma, Phys. Rev. Lett. 64 (19), 1990, pp.2281-2284.
- Sakai O. et.al. High Radial Confinement mode induced by dc limiter biasing in the HIEI tandem mirror Phys. Rev. Lett. 70 (26), 1993, pp. 4071-4074.

Небольшие скачки потенциала

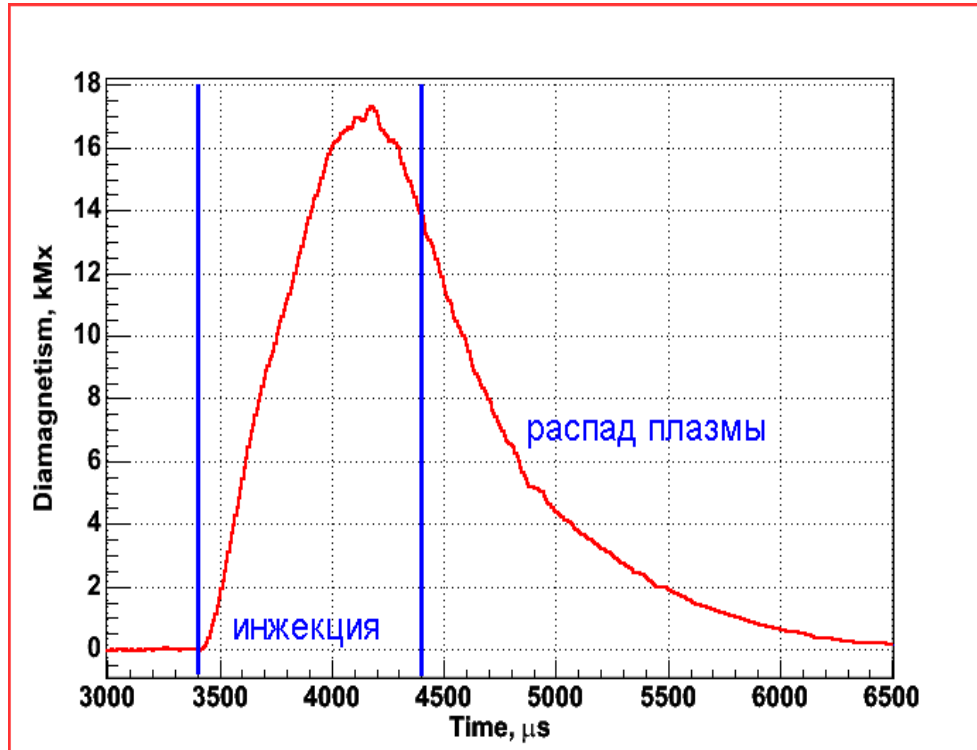


Отрицательное смещение на лимитере (-25 В)



Положительное смещение на лимитере (+25 В)

Результаты: сигналы диамагнетизма плазмы в различных режимах



Сигнал диамагнетизма
быстрых частиц

Время торможения горячих
ионов на электронах

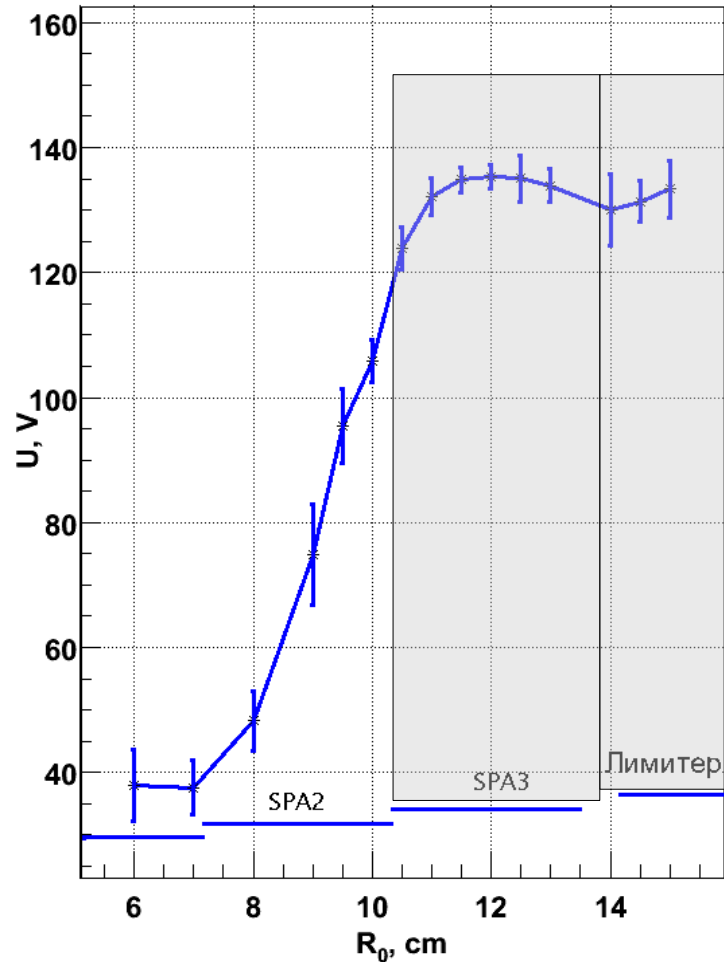
U, V	$\tau_{decay}, \mu s$
0	259 ± 14
+25	502 ± 33
-25	506 ± 32
+150	555 ± 36

$$\tau_{ie} = \frac{3}{4\sqrt{2}\pi} \frac{m_i}{\sqrt{m_e}} \frac{T_e^{3/2}}{\Lambda e^4 n} \approx 540 \mu s$$

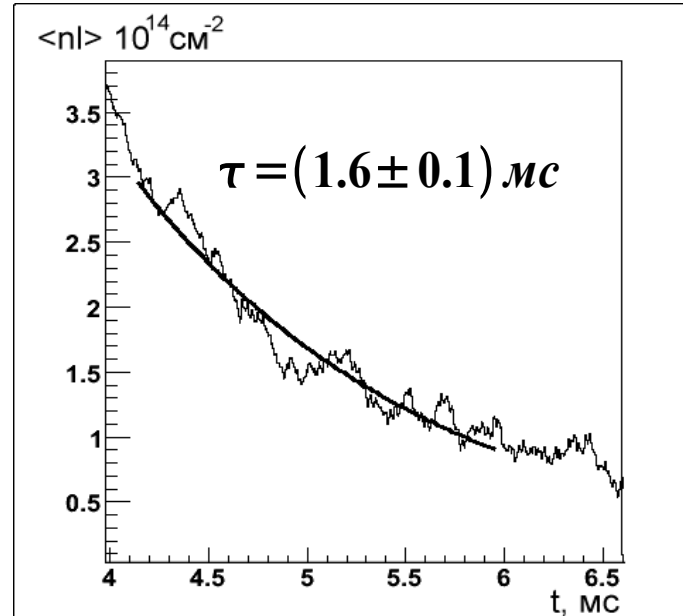
Устойчивый режим удержания

$$U_{\text{лим}} = U_{\text{SPA3}} = +150\text{В}; U_{\text{SPA2}} = U_{\text{SPA1}} = 0$$

Плавающий потенциал



Потенциал зонда в плазме



Линейная плотность
плазмы

$$\tau_{\text{GDT}} \approx 1.5 \text{ ms}$$

Время жизни
быстрых ионов

$$\tau_{fi} = (738 \pm 18) \mu\text{s}$$

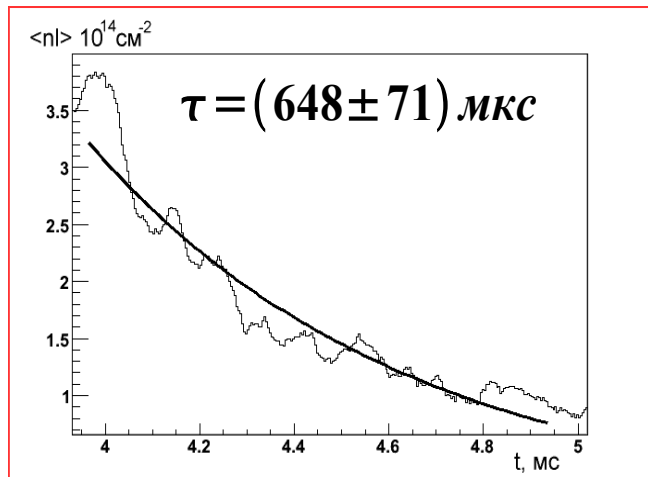
$$(\tau_{\text{drag}} \approx 700 \text{ мкс})$$

$$V_{dr} \approx c \frac{E}{B_0} \approx 1.6 \cdot 10^6 \text{ cm/s} \longrightarrow \tau_{rot} \approx 20 \text{ мкс}$$

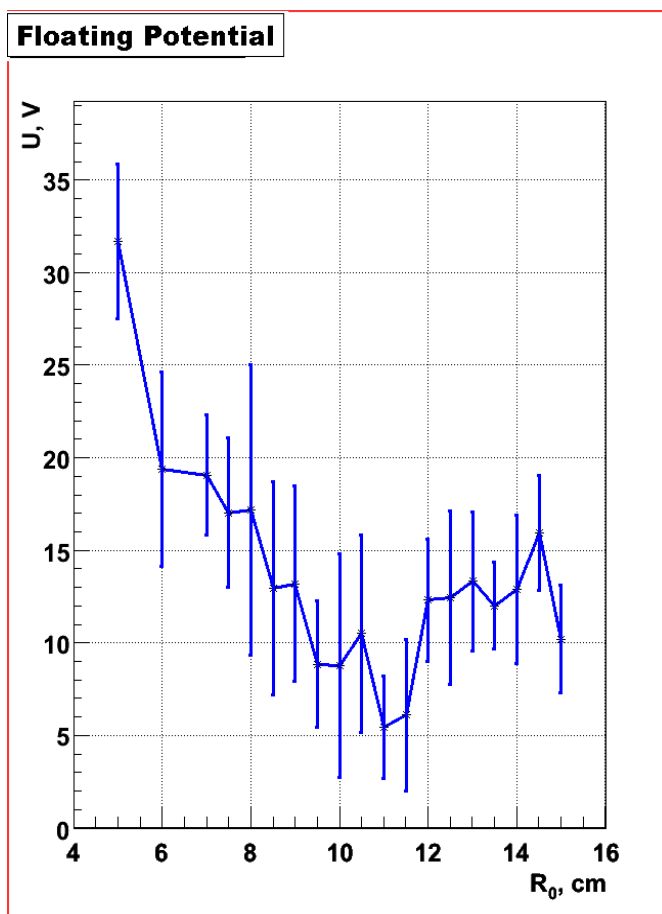
$$(\tau_{\text{MHD}} \approx 15 \text{ мкс})$$

Неустойчивый режим удержания

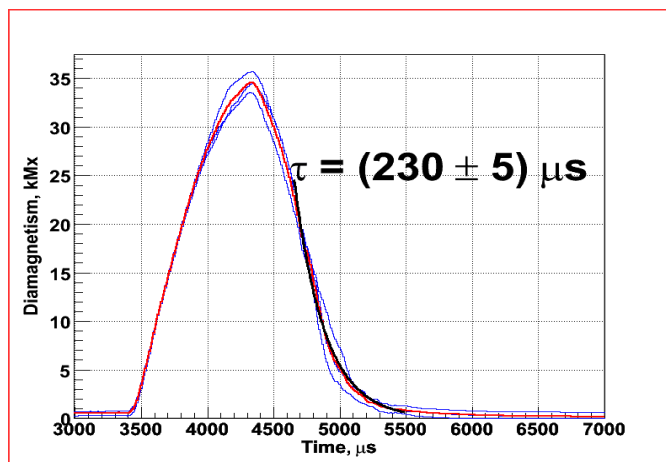
лимитер и плазмopриёмники заземлены



Линейная плотность плазмы



Потенциал зонда в плазме



Диамagnитный сигнал быстрых частиц

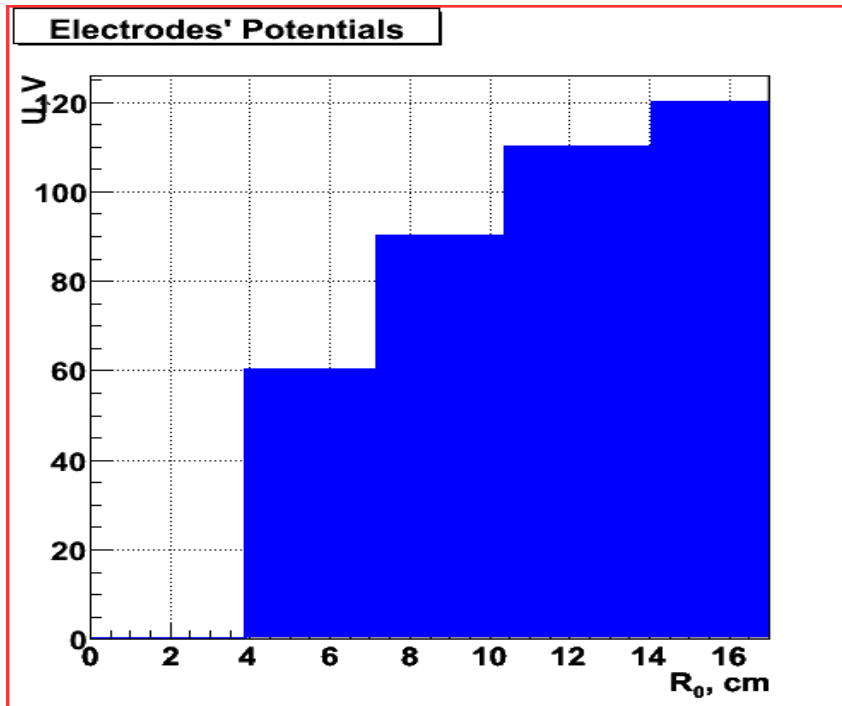
В устойчивом режиме

$\tau_{target} = (1.6 \pm 0.1) \text{ мс}$
т.е. в 2.5 раза больше

$\tau_{fast} = (740 \pm 20) \text{ мкс}$
т.е. в 3.2 раза больше

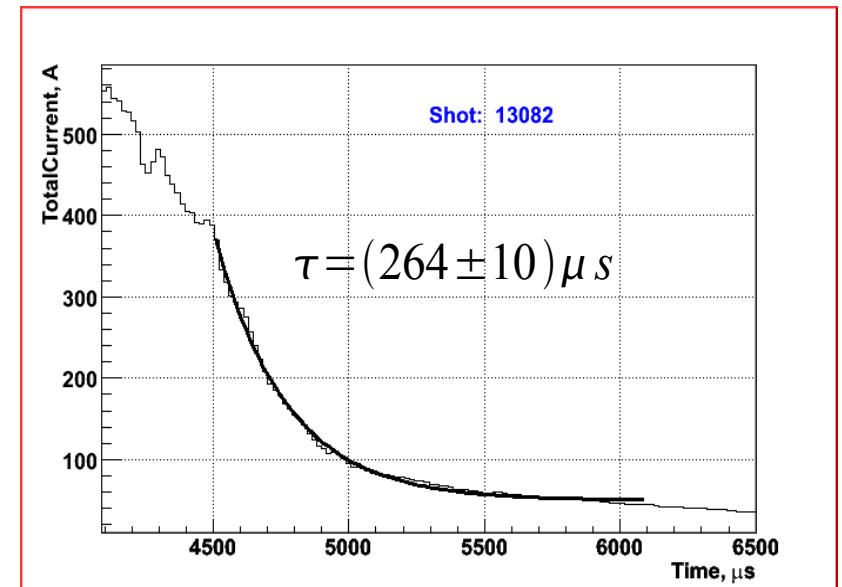
Неустойчивый режим удержания

Плазмоприемники под плавающим потенциалом,
на лимитере +150 В



Распределение потенциала
по электродам

*Нет достаточно большого скачка
потенциала => неустойчивое
удержание*



Полный ток на торец

Время жизни
быстрых ионов
 $\tau_{fi} = 259 \pm 11 \mu s$

Теоретическое описание

«Вихревой транспортный барьер»

Область дифференциального $[E \times B]$ вращения плазмы определяется радиальными токами

$$\mathbf{j}_{\perp} = c \left[\frac{\mathbf{b}}{B} \times \left(m_i n_i \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \nabla p \right) \right]$$
$$j_{\parallel} = j_{i0} \left(1 - \exp \left[\frac{e\varphi_w + e\varphi_d - e\varphi}{T_e} \right] \right)$$

Условие замыкания токов...

$$\left\langle \frac{\operatorname{div} \mathbf{j}_{\perp}}{B} \right\rangle_L = -\frac{1}{L} \int_{-l_w}^{l_w} dl \frac{\partial}{\partial l} \frac{j_{\parallel}}{B} \approx -\frac{2j_{\parallel}(l_w)}{LB(l_w)}$$

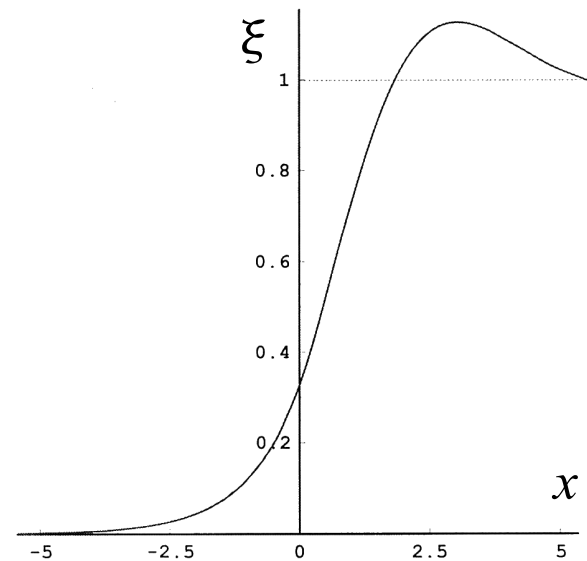
φ_w — потенциал стенки

φ_d — дебаевский скачок вблизи стенки

L — расстояние между плазмоприемниками

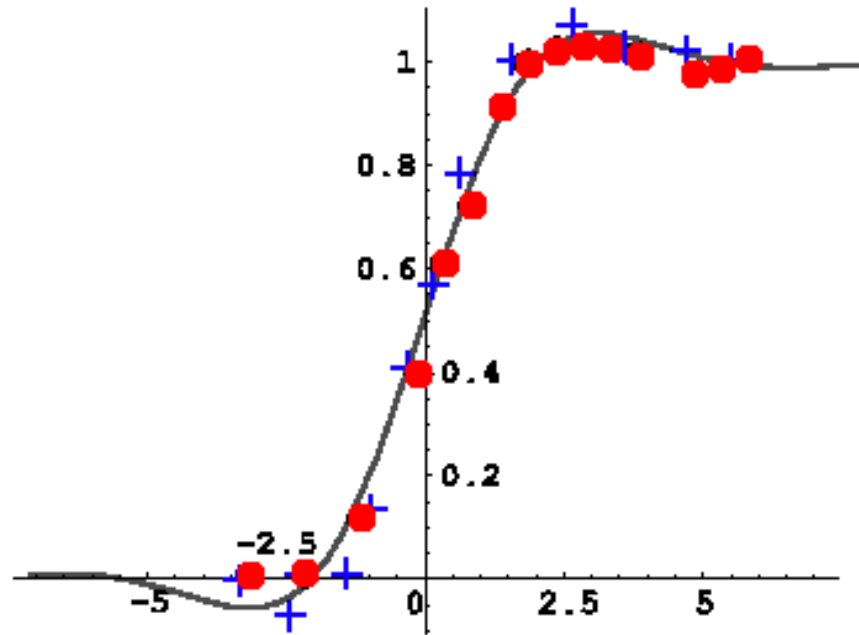
...сводится к уравнению вида

$$\xi - \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} = \theta(x)$$



Решение уравнения, начало координат соответствует положению скачка потенциала

Теория и эксперимент (1)



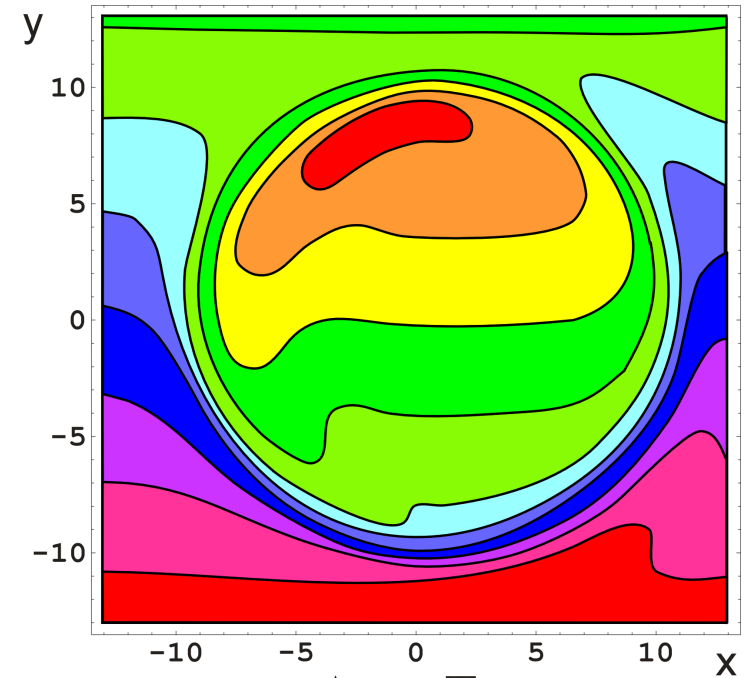
Сравнение аналитического решения (**черная кривая**) с экспериментом:

Красные точки – скачок потенциала между SPA3 и SPA2

Синие крестики – скачок между SPA3 и лимитером

Условие стабилизации $\Delta r \ll a$,
где a – радиус плазмы в ГДЛ ~ 10 см.

Ширина слоя $\frac{\Delta r}{a} \propto \frac{T_e}{a^2 j_{i0}}$;



$\Delta\varphi_w = T_e$
Линии потока в центральном сечении плазмы

В случае отсутствия неустойчивости

$$\Delta r \sim \rho_{Li} \simeq 0.5 \text{ см},$$

при наличии неустойчивости

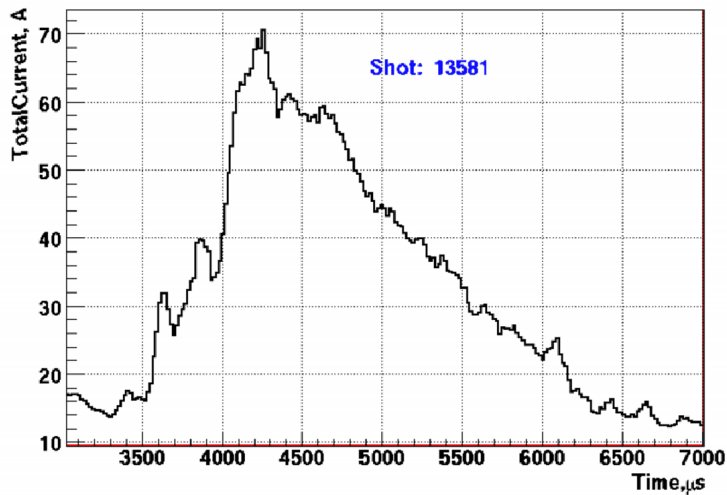
$$\Delta r \sim 10 \rho_{Li}$$

Теория и эксперимент (2)

Оценка продольного тока в слое:

$$j_{\parallel theory} = j_{i0} \left(1 - \exp \left[\frac{e \Delta \varphi}{T_e} \right] \right) \frac{B_w}{B_m} \approx 61 \frac{mA}{cm^2}$$

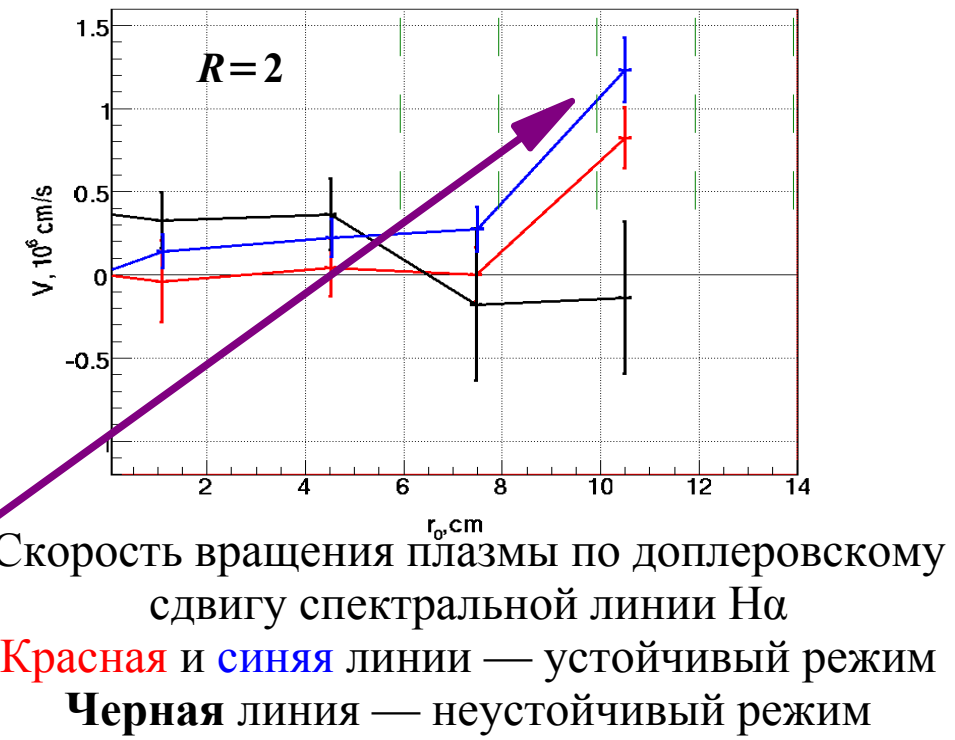
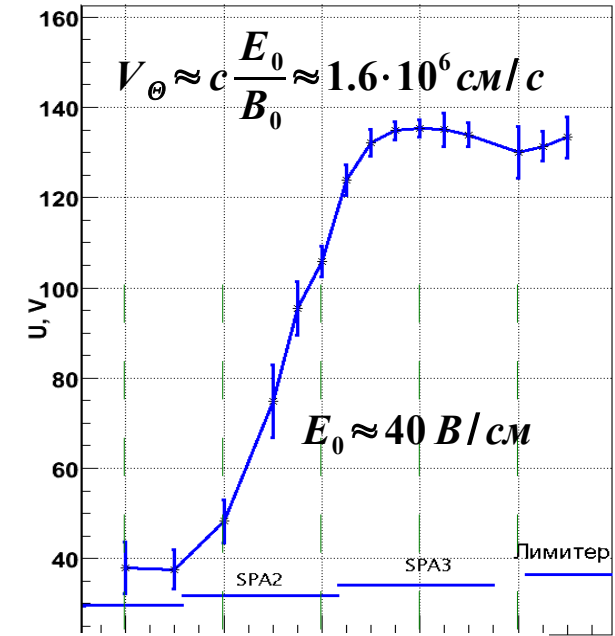
$$j_{\parallel exper} = \frac{60A}{952 cm^2} \approx 63 \frac{mA}{cm^2}$$



Полный ток на SPA2

$$E = \frac{V B}{c} \approx 60 V/cm \Rightarrow E_0 \approx 43 V/cm$$

Плавающий потенциал



Возможности применения метода стабилизации лимитерами

$$\text{Ширина слоя } \frac{\Delta r}{a} \propto \frac{T_e}{a^2 j_{i0}};$$

$$j_{0i} \approx enV_i \sim n\sqrt{T_e};$$

$$\frac{\Delta r}{a} \sim \frac{T_e}{n\sqrt{T_e}a^2} \sim \frac{\sqrt{T_e}}{na^2};$$

$$n \text{ зафиксируем} \rightarrow \frac{\Delta r}{a} \sim \frac{\sqrt{T_e}}{a^2}$$

Параметры Нейтронного Источника

$$T_e = 1.1 \text{ кэВ};$$

$$n_i = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3};$$

$$a = 8 \text{ см};$$

$$R = 15;$$

$$W_{total} = 60 \text{ МВт.}$$

для проекта Нейтронного Источника T_e надо увеличить **~10 раз**,
значит a следует увеличить в **1.78** раза.

Мощность, требуемая для обеспечения такой стабилизации
~ 1 МВт.

Модернизация системы атомарной инжекции

Длительность инжекции

Суммарная мощность 6 пучков

Плотность быстрых частиц

Плотность мишенной плазмы

Относительное давление плазмы

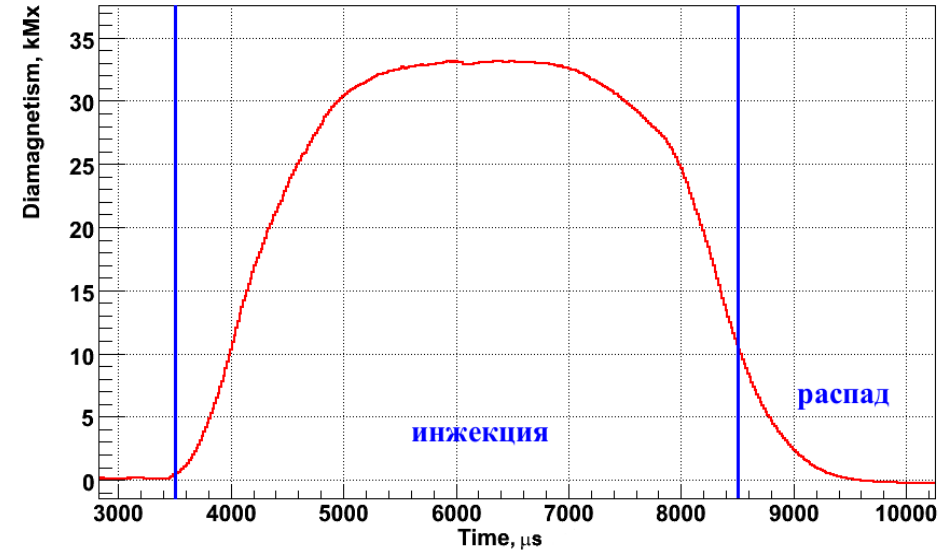
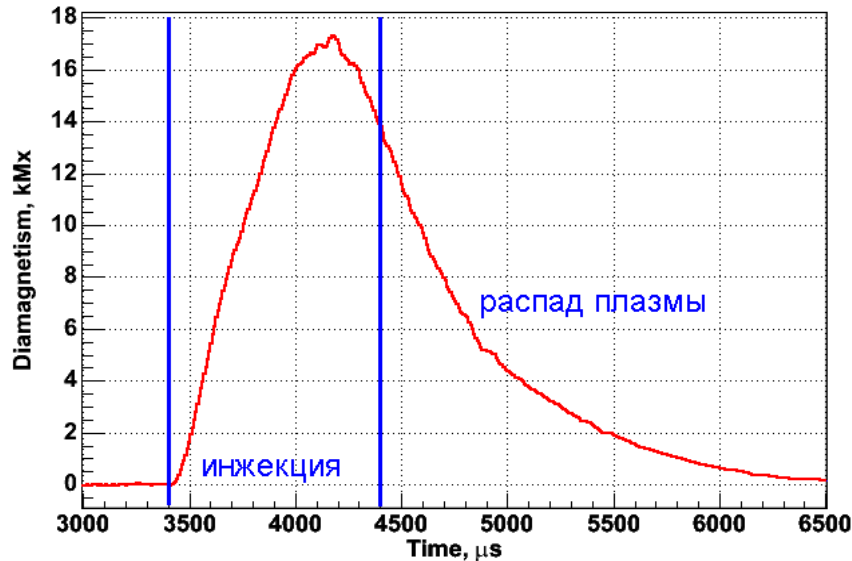
увеличена с 1 мс до 5 мс

3.5 MWm

$$n_{fast} \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

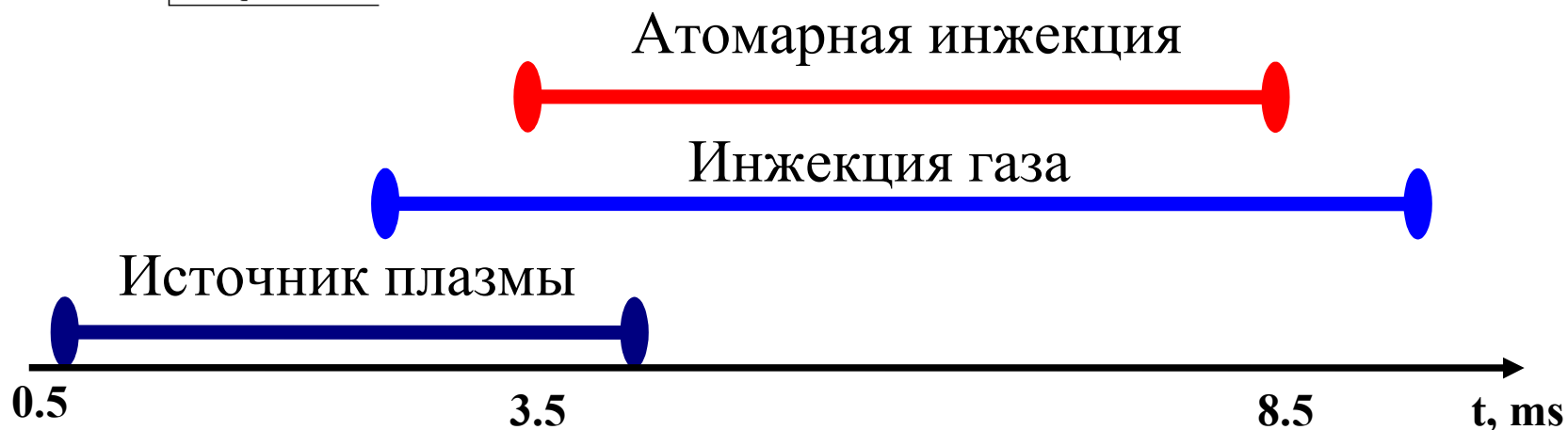
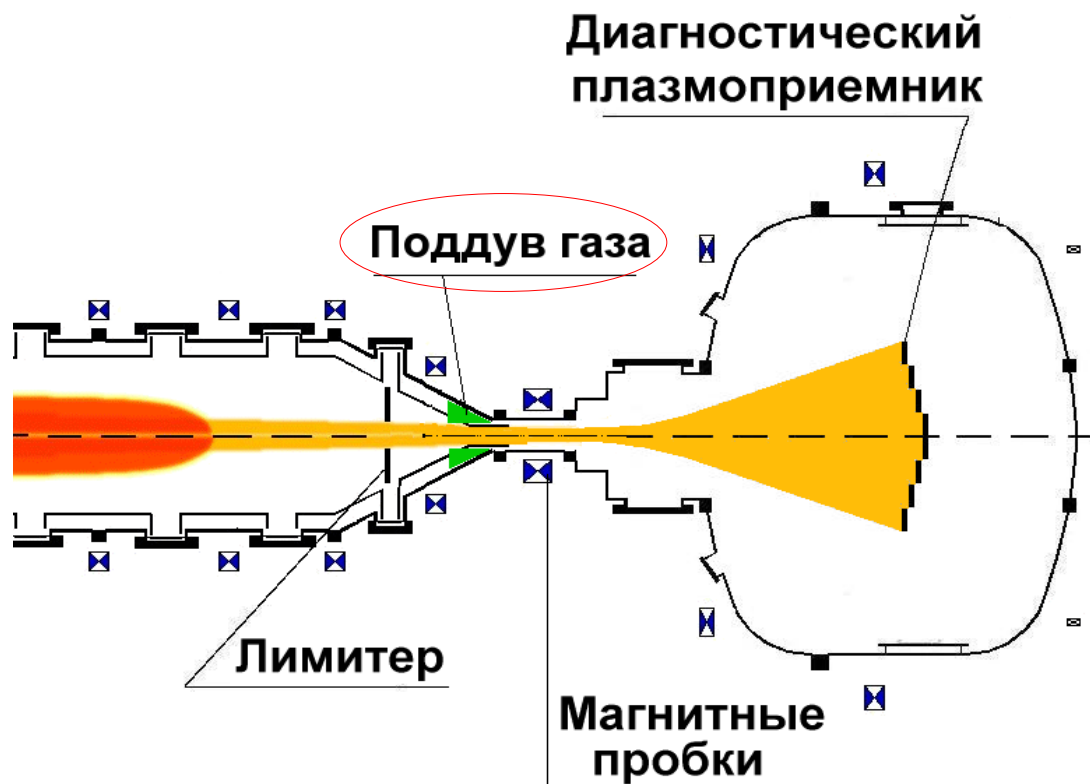
$$n_{target} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$\beta \approx 60\%$$



Диаманитные сигналы быстрых частиц
ДО и **ПОСЛЕ**
модернизации системы инжекции

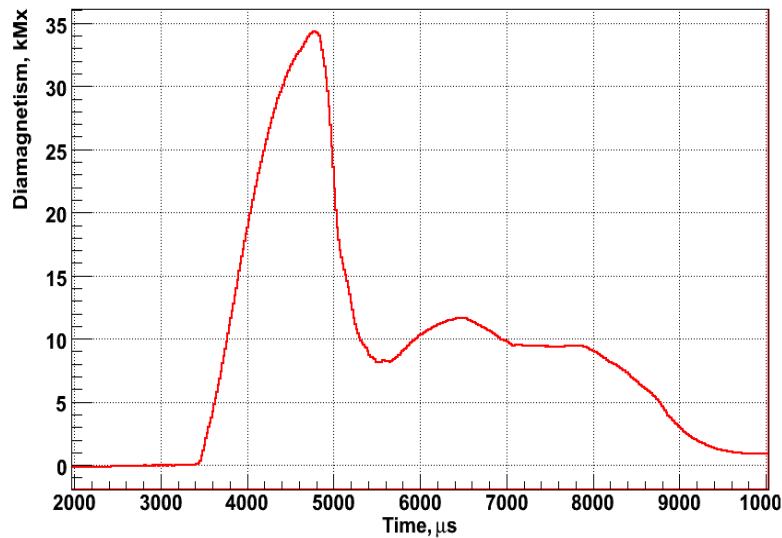
Метод поддержания баланса частиц



Временная диаграмма эксперимента

Стабилизация в стационарном режиме

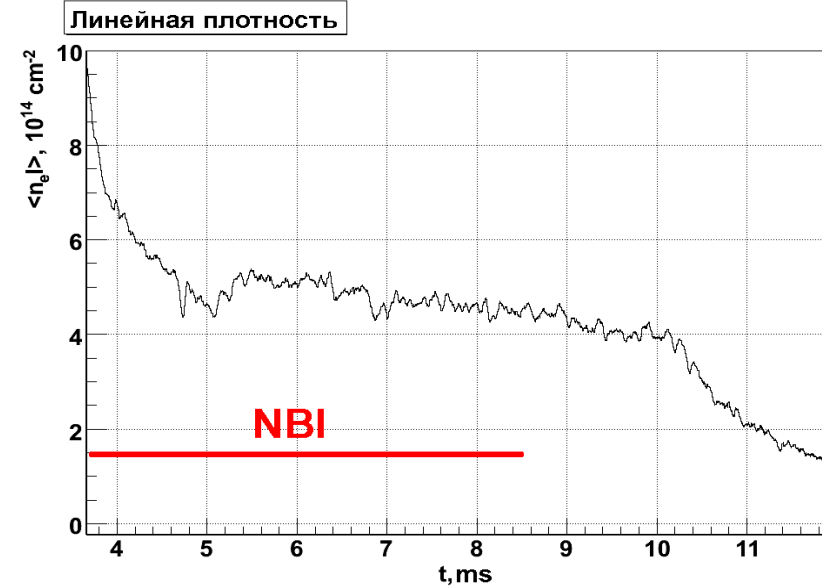
Лимитеры заземлены



На лимитерах +200В

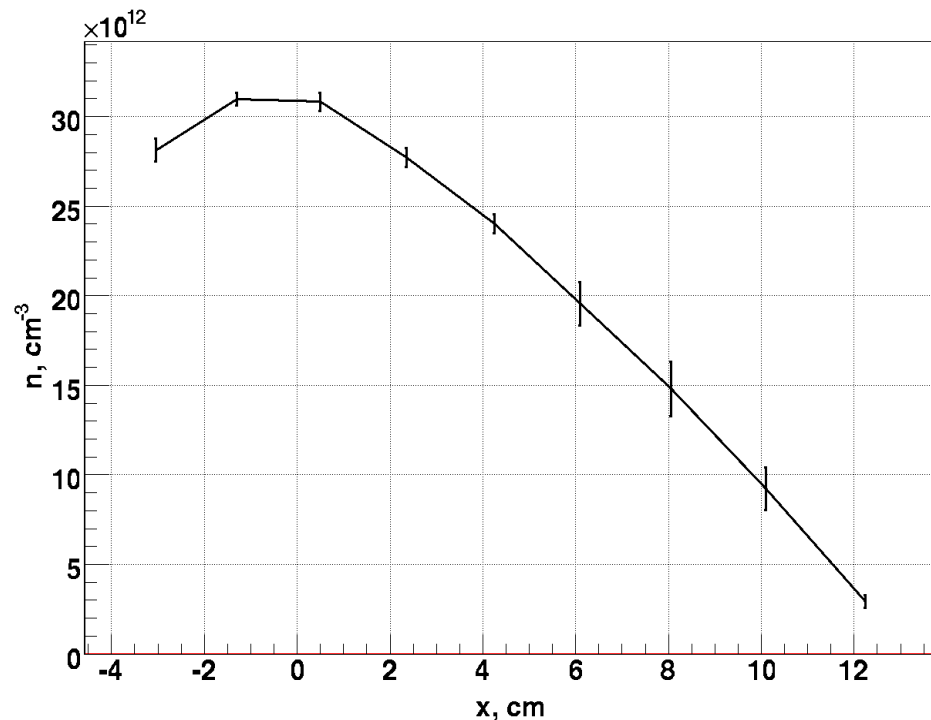
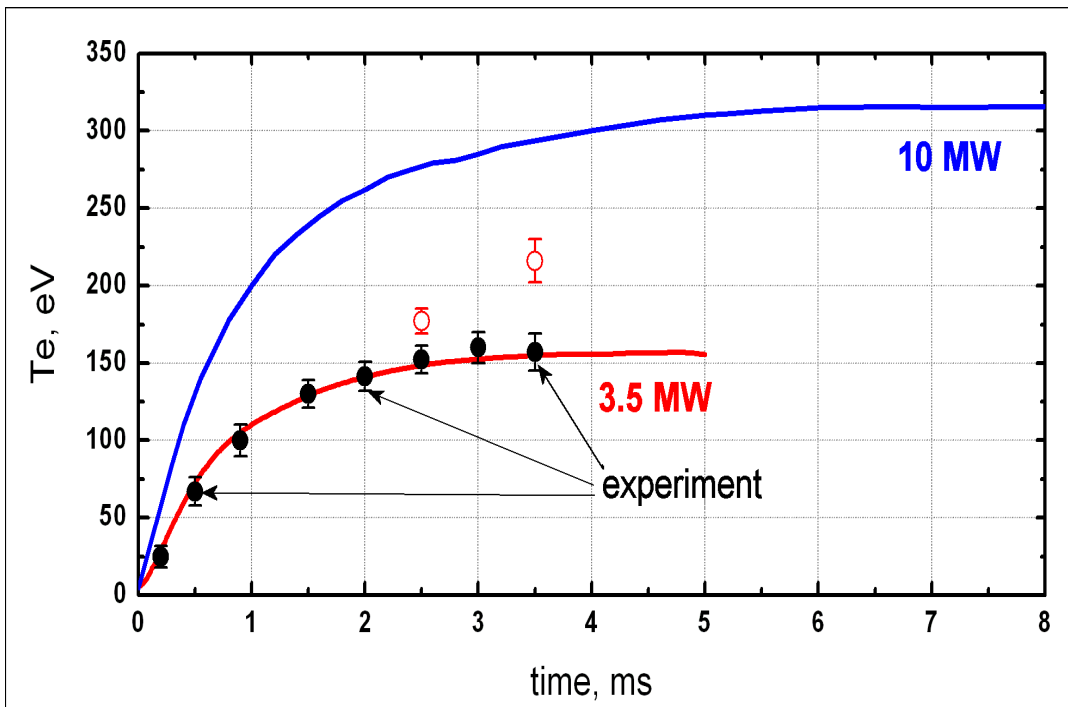


Диамнитный сигнал быстрых частиц



Линейная плотность плазмы

Стационарный режим с инъекцией водорода



Температура электронов по данным томсоновского рассеяния, начало отсчета — старт инъекции.

Черные точки — результаты эксперимента в режиме с поддувом газа

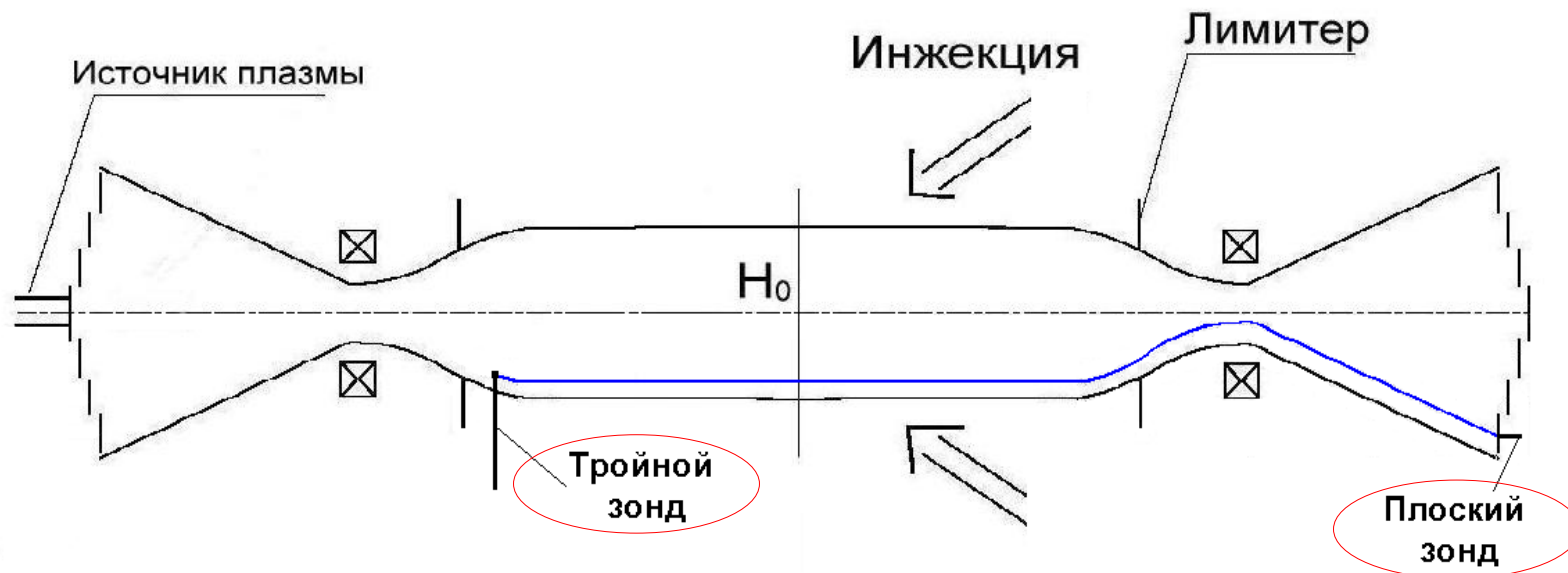
Красные точки - результаты эксперимента в «распадном» режиме

Кривые — результаты расчета кодом MCFIT

Плотность мишенной плазмы в центральной плоскости по данным «профилометра»

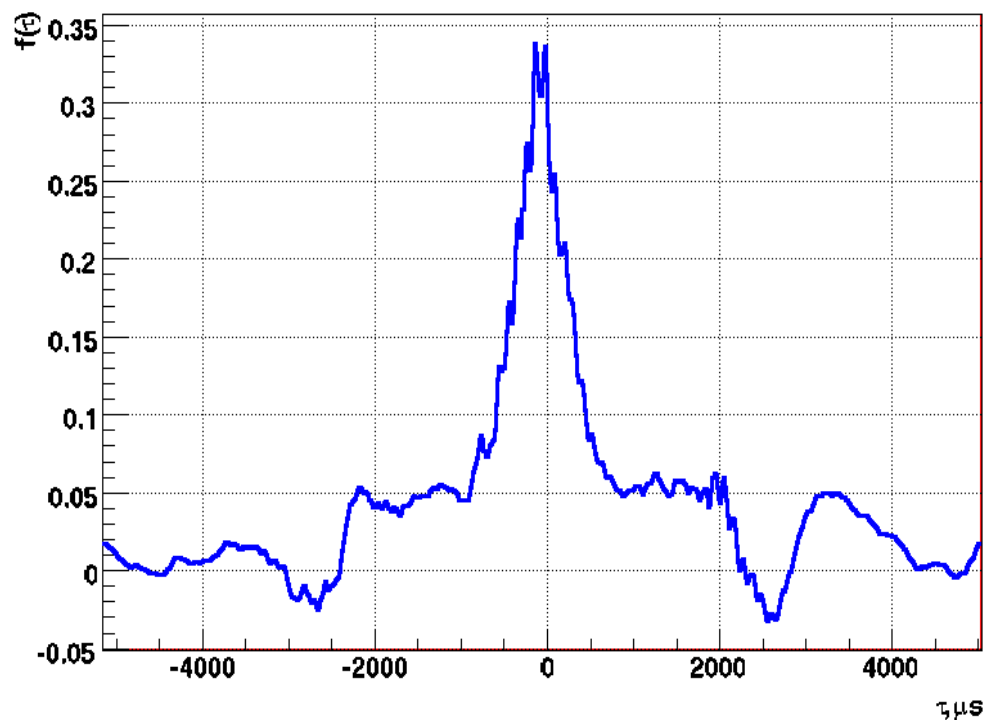
Вывод: *удержание частиц и энергии в приосевой области плазмы определяется продольным газодинамическим истечением!*

Доказательство «желобковости» колебаний

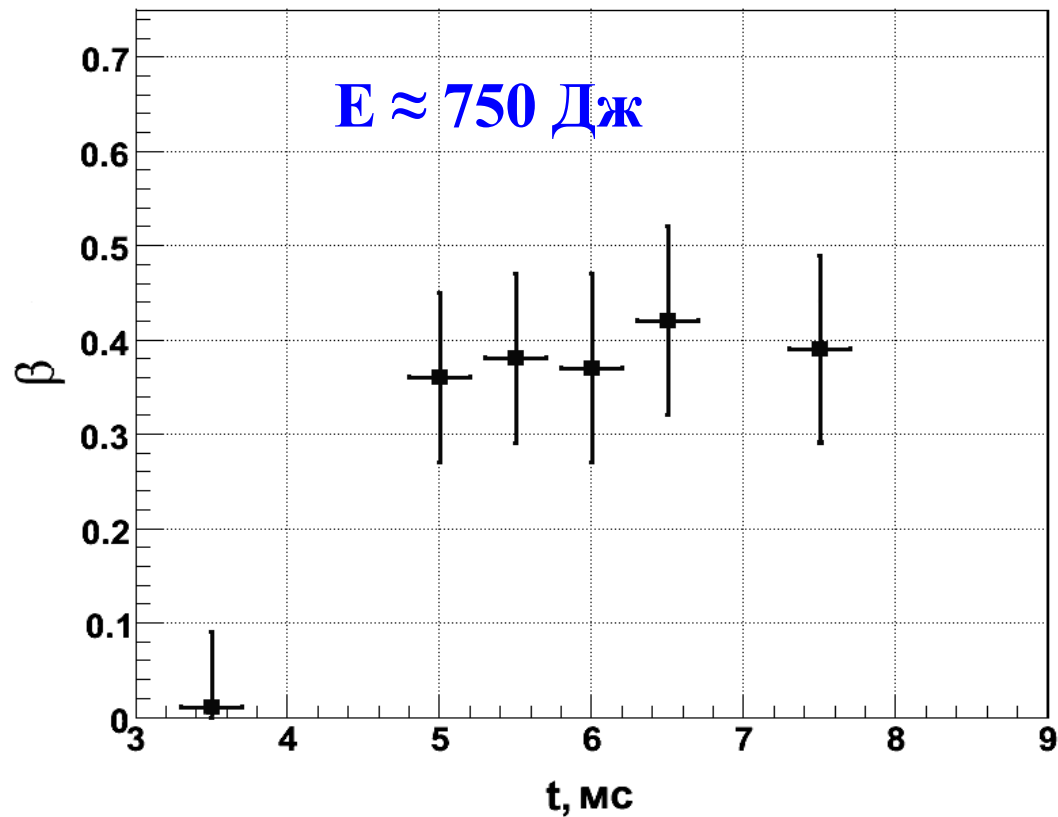


*Корреляционная функция
сигналов с двух
диагностических зондов,
установленных на одной
силовой линии*

Correlation Function

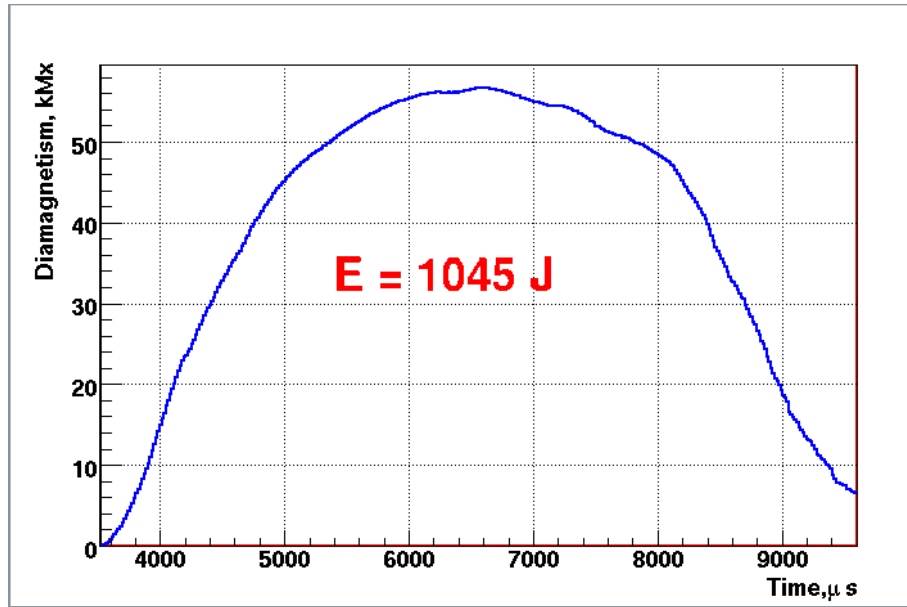


Стационарный режим с инъекцией *дейтерия*

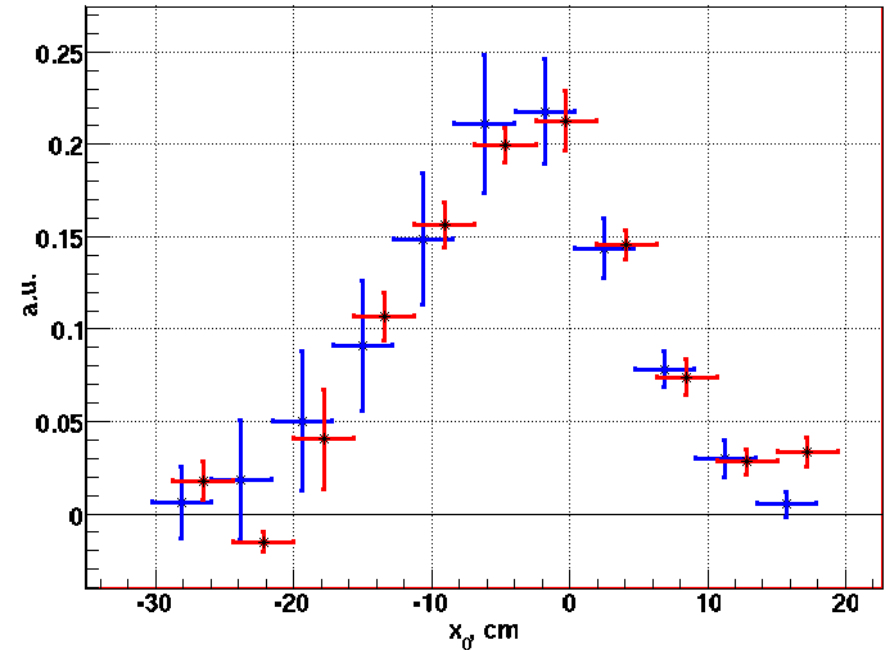


Относительное давление плазмы по данным
пучково-спектроскопической диагностики

Стационарный режим с инъекцией дейтерия



Диамангнитный сигнал быстрых ионов



Плотность быстрых ионов с энергией 14 кэВ:
синие точки — при энергосодержании 750 Дж,
красные точки — при энергосодержании > 1000 Дж

Оценка относительного давления

Оценка плотности быстрых ионов

$$\beta \approx 60\%$$
$$n \approx 3.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Измерение конвективных поперечных потерь

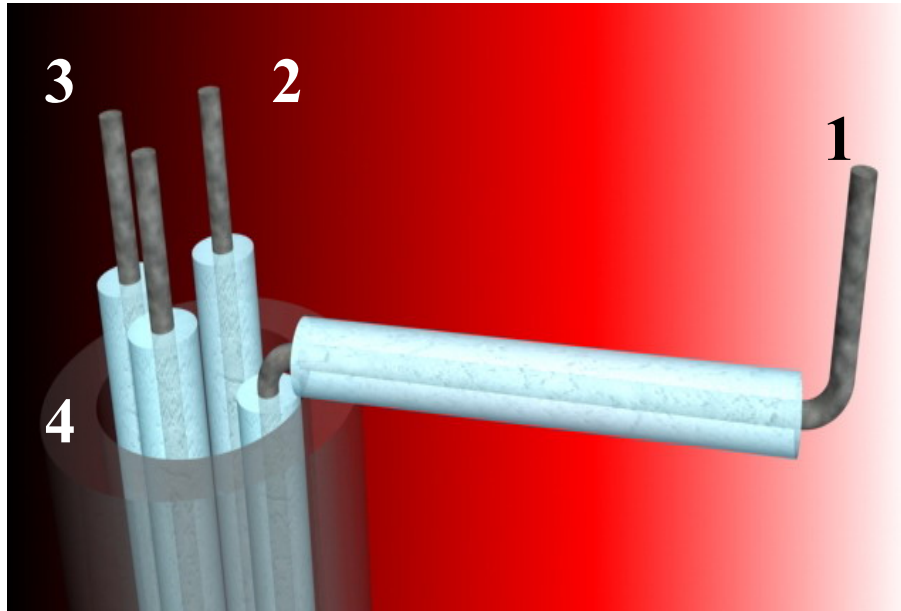


Схема комбинированного зонда

$$\Gamma \langle (n + \tilde{n})(V + \tilde{V}) \rangle \approx \langle \tilde{n} \tilde{V} \rangle$$

$$V = c \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2};$$

$$V_r = c \frac{\tilde{E}_\varphi}{B}; E_\varphi = \frac{\Delta U}{d}$$

$$\langle \Gamma(r) \rangle = \frac{c}{B} \langle \tilde{n} \tilde{E}_\varphi \rangle.$$

Электроды 1 и 3 $\rightarrow \Delta U$

Электроды 2 и 4 $\rightarrow n$

Время жизни, рассчитанное по поперечным потерям,

В устойчивом режиме $\Gamma \simeq 2.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ \longrightarrow $\tau_\perp \approx 130 \text{ мс}$
 $\omega \simeq 10 - 15 \text{ кГц}$

В неустойчивом режиме $\Gamma \simeq 4.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ \longrightarrow $\tau_\perp \approx 8.4 \text{ мс}$

Использование антипробкатора в качестве МГД-якоря: история

Q — «запас устойчивости»

При энергосодержании в быстрых ионах < 150 Дж

$$Q = \left| \frac{\delta W_{cusp}}{\delta W_{fi} + \delta W_{cc}} \right| \sim 2.5$$

$\delta W_{cusp}, \delta W_{cc}$ — возмущения энергии мишенной плазмы в каспе и в центральной ячейке

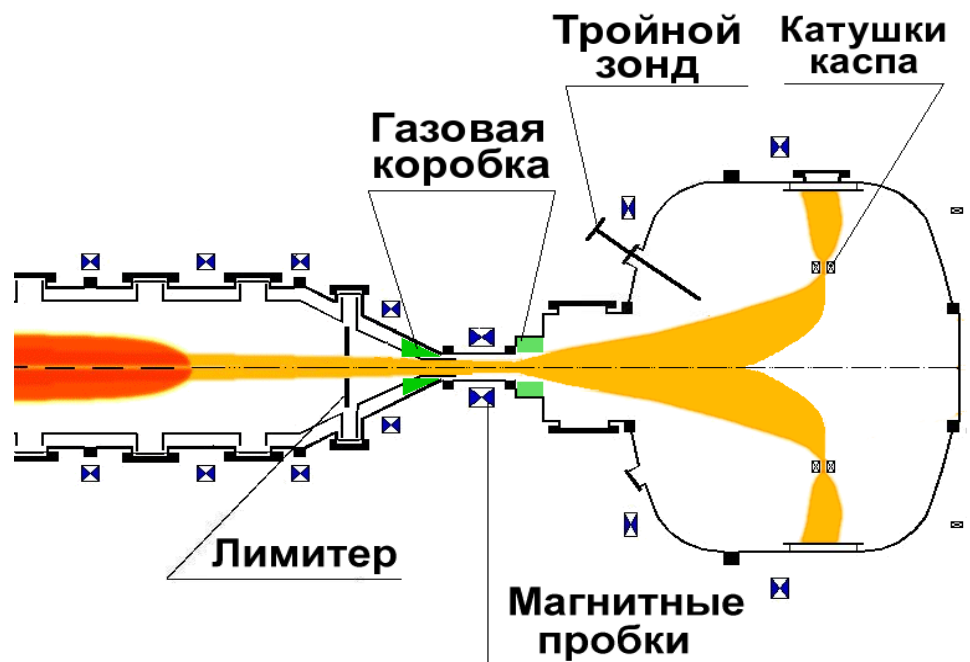
δW_{fi} — возмущение энергии популяции быстрых ионов в центральной ячейке

1. А.А.Иванов, Удержание и нагрев плазмы в газодинамической ловушке, дисс. док. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1994.
2. А.В.Аникеев и др., МГД-устойчивость плазмы в газодинамической ловушке, стабилизированной антипробкатором, Препринт ИЯФ 94-90, 1994.

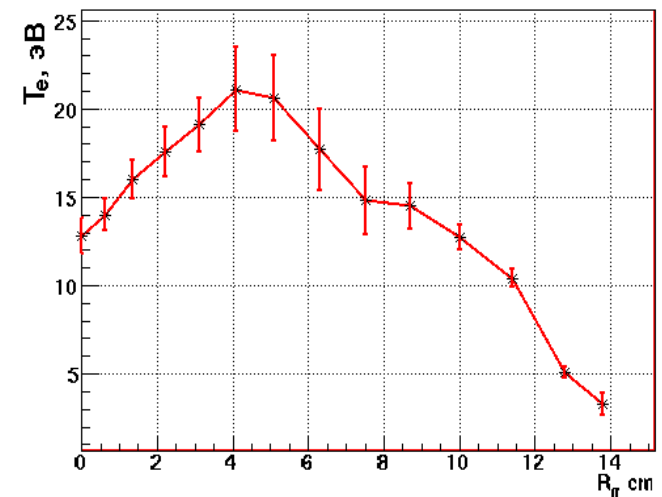
Задачи экспериментов с МГД-якорем:

- Увеличить стабилизирующее действие якоря за счет увеличения в нем среднего давления плазмы в режимах с дополнительной инъекцией газа в заprobочную область;
- Измерить диамагнетизм быстрых ионов при максимально достижимых параметрах плазмы в якорь;
- Провести сравнение достигнутого диамагнетизма быстрых ионов с соответствующим результатом эксперимента при использовании вихревого транспортного барьера;
- Сделать расчет достигнутого «запаса устойчивости», произведя измерения параметров плазмы в якорь.

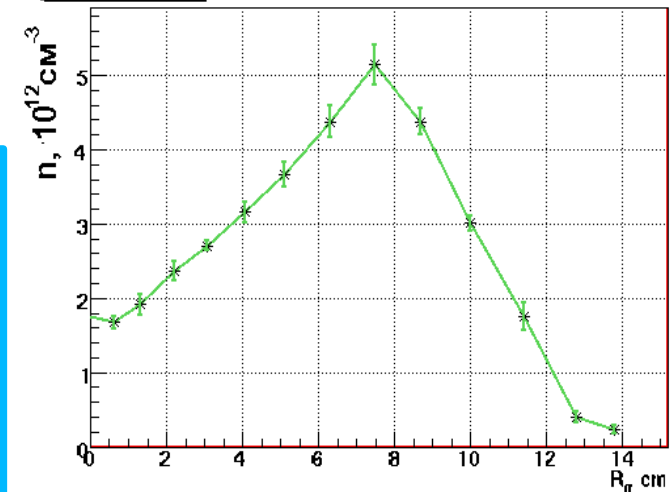
Стабилизация антипробкотроном (полукаспом)



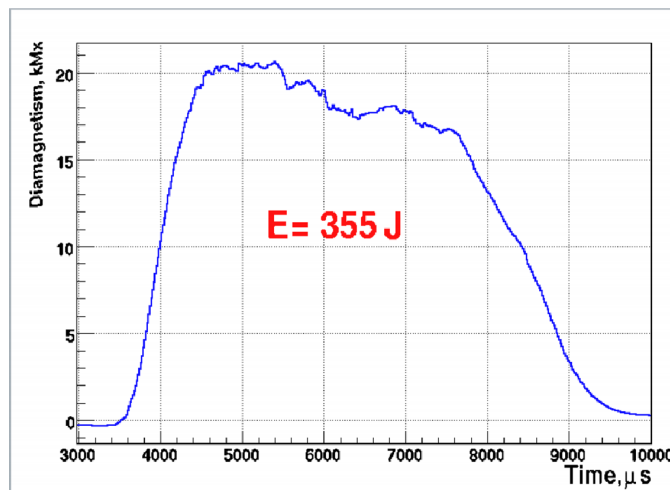
Температура



Плотность



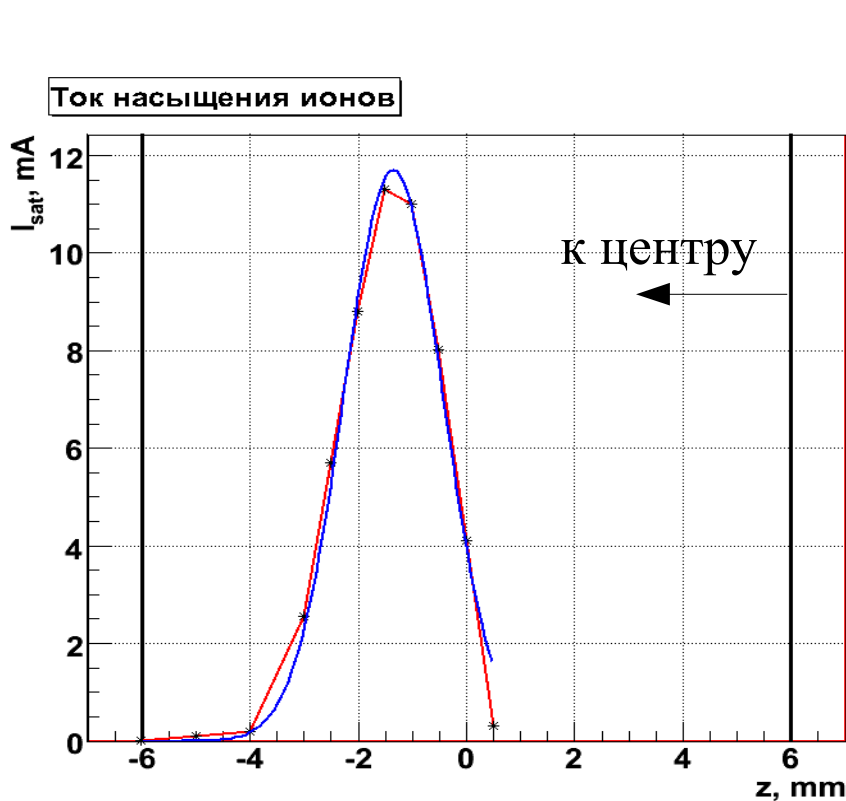
Параметры плазмы в
полукаспе



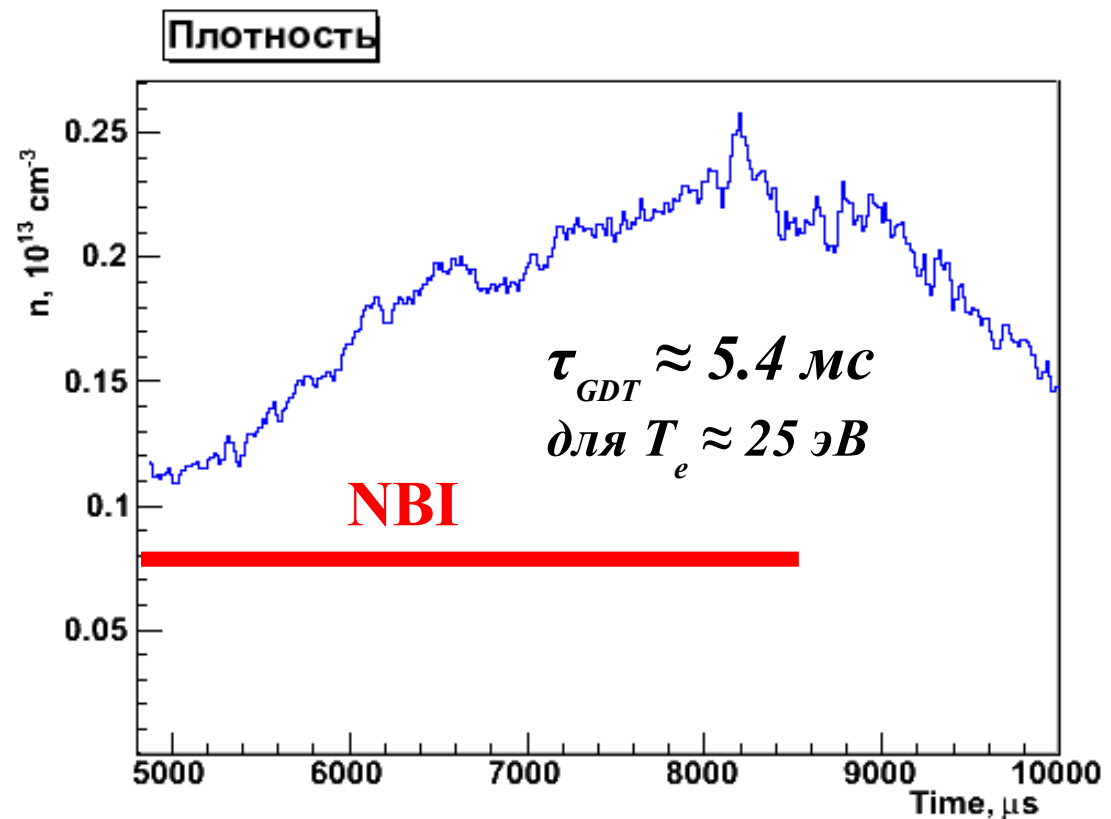
Температура на
оси в центральной
плоскости в
момент времени
4.5 мс
 $T_{max} \approx 110$ эВ

Диамagnetизм быстрых ионов

Стабилизация антипробкотроном (2)



Ток насыщения в щели
полукаспа



Эволюция плотности плазмы
в полукаспе

*В наиболее существенной части объема
полукаспа плазма удерживается в
газодинамическом режиме*

Стабилизация антипробкотроном (3)

«Запас устойчивости»

$$Q = \frac{\delta W_{cusp}}{\delta W_{fast} + \delta W_{target}}$$

$$\delta W_{cusp} = \pi \int d\Phi H_{min} \xi_0^2 \Phi \left(\frac{\partial P}{\partial \Phi} \frac{\partial U}{\partial \Phi} + \gamma \frac{P}{U} \left(\frac{\partial U}{\partial \Phi} \right)^2 \right)$$

Д.Д. Рютов, Г.В. Ступаков Физика плазмы, т.12, вып.12 (1986) с.1411

$$\delta W_{target} = -2\pi \frac{L}{H_0} \left(\frac{R-1}{R} \right)^2 \left(\frac{\xi_0}{L} \right) E_{target}$$

$$\delta W_{fast} = \frac{-\pi}{H_0} \left(\frac{R-1}{R} \right)^2 \left(\frac{\xi_0}{L} \right) E_{fast}$$

H_0 – магнитное поле в центральном сечении

H_{min} – минимальное магнитное поле в полукаспе

Φ – магнитный поток

P – давление в полукаспе

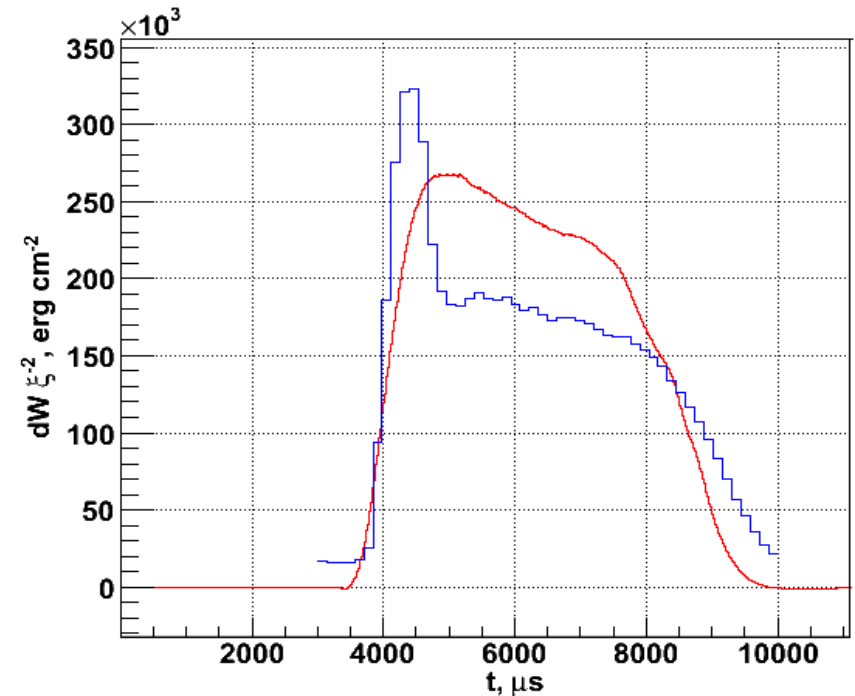
ξ_0 – смещение в центральной плоскости

$U = \int \frac{dl}{H}$ – объем силовой трубки

L – половина длины ловушки

R – пробочное отношение

E_{target}, E_{fast} – энергосодержание в мишенной плазме и в быстрых ионах



Синяя кривая – вариация энергии в полукаспе

Красная кривая – вариация энергии в центральной ячейке

Антипробкотрон обеспечивает «запас устойчивости»

$Q \approx 1$ при $W_{fast} = 350$ Дж ($\beta \approx 20\%$)

Положения, выносимые на защиту (1)

- Рассмотрены различные физические механизмы, способные уменьшать инкремент желобковой неустойчивости плазмы в ГДЛ. Показано, что естественные факторы, такие, как вынос импульса в расширитель и наличие в нем плазмы с ненулевой плотностью, не могут существенно влиять на скорость развития неустойчивости. В серии экспериментов показано, что МГД-неустойчивость не может быть подавлена за счет контакта плазмы с радиальными и торцевыми лимитерами.
- Обосновано предположение о возможности подавления желобковой неустойчивости в ГДЛ путем создания внутри плазмы области с дифференциальным вращением, которая образуется при формировании перепада электрических потенциалов на коаксиальных секциях радиальных и торцевых лимитеров.
- Проведено экспериментальное обоснование теоретической модели, описывающей механизм подавления МГД-неустойчивости при дифференциальном вращении плазмы в ГДЛ. Результаты теоретического рассмотрения позволяют рекомендовать указанный метод для МГД-стабилизации плазмы в проектируемом источнике нейтронов на основе газодинамической ловушки.

Положения, выносимые на защиту (2)

- ◆ Реализовано удержание плазмы в стационарных режимах с дифференциальным вращением. В этих условиях достигнуты максимальные на сегодняшний день для ГДЛ параметры: температура электронов $T_e \approx 150 \text{ эВ}$, относительное давление $\beta \approx 60\%$, плотность быстрых ионов $n_f \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Сравнение результатов измерений и численного моделирования в этом режиме показывает, что в приосевой области плазмы потери энергии и частиц определяются продольным газодинамическим истечением.
- ◆ Показано, что в устойчивых режимах удержания внутри области дифференциального вращения конвективные потери частиц поперек магнитного поля не превышают классических.
- ◆ Изучена эффективность стабилизации при помощи МГД-якоря — антипробкотрона в режиме стационарного удержания. Для увеличения «запаса устойчивости» реализован метод инъекции газа в антипробкотрон, предложенный ранее в рамках проекта источника нейтронов на основе ГДЛ. Указанная мера позволила удвоить энергосодержание быстрых ионов по сравнению с соответствующей величиной, полученной ранее в аналогичном режиме. Согласно результатам оценки, относительное давление достигло $\beta \approx 20\%$, при величине «запаса устойчивости» $Q \approx 1$.

Оценка мощности, затрачиваемой на стабилизацию дифференциальным вращением

$$\frac{W_{stab}}{W_{total}} = \frac{T_e \cdot J_{\parallel}}{8 T_e \cdot I_{\parallel}}$$

I_{\parallel} - полный продольный ток из ловушки
 J_{\parallel} - полный ток, текущий в периферийном слое, где реализуется перепад потенциала

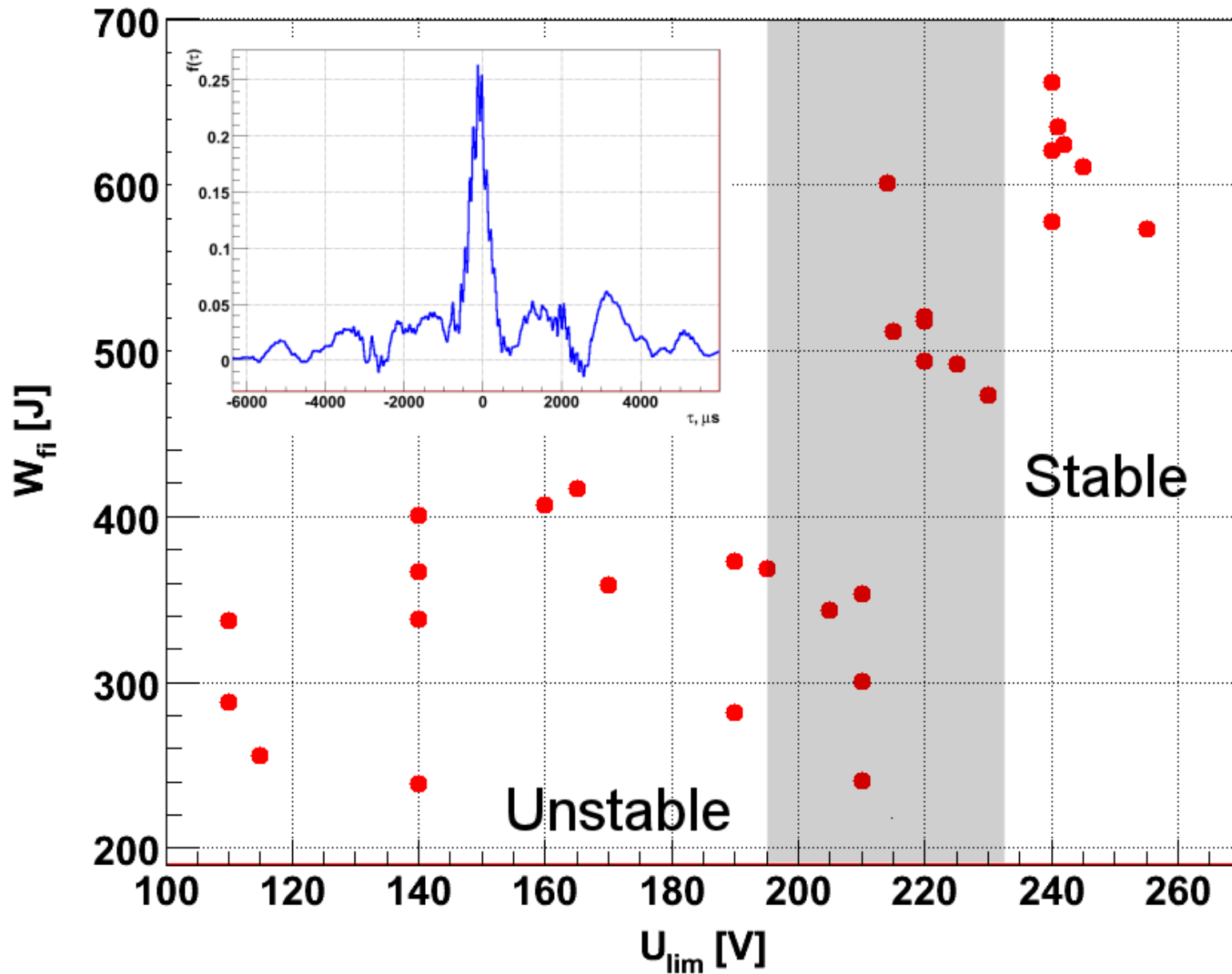
$J_{\parallel} = 0.25 \left(1 - \exp\left[-\frac{e \Delta \varphi}{T_e}\right] \right) I_{\parallel}$, так как по данным торцевых приемников в слое течет четверть полного продольного тока

Значит, при $e \Delta \varphi = T_e$

$$\frac{W_{stab}}{W_{total}} = \frac{T_e \cdot 0.16 I_{\parallel}}{8 T_e \cdot I_{\parallel}} = 0.02$$

Если $W_{total} = 60$ МВт, то на стабилизацию нужно затратить 1.2 МВт.

Энергия быстрых ионов в зависимости от перепада потенциала в плазме



Список публикаций

Публикации:

1. P. A. Bagryansky, A. D. Beklemishev, M.S. Chaschin, E.I. Soldatkina, Radial Electric Fields and Radial Currents in the Gas Dynamic Trap, Fusion Science and Technology Volume 51 Number 2T February 2007 Pages 337-339
2. P.A. Bagryansky, A.D. Beklemishev, E.I. Soldatkina, Influence of Radial Electric Field on High-Beta Plasma Confinement in the Gas Dynamic Trap, Fusion Science and Technology Volume 51 Number 2T February 2007 Pages 340-342
3. Е.И.Солдаткина, П.А.Багрянский, А.Л.Соломахин, Влияние радиального профиля электрического потенциала на удержание двухкомпонентной плазмы с высоким бета в газодинамической ловушке, Физика Плазмы 34, №4, стр.1-6.

Доклады:

1. П.А. Багрянский, Е.И. Солдаткина, Влияние пристеночной плазмы на МГД-устойчивость в газодинамической ловушке, Тезисы докладов XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2006, стр. 80
2. P.A.Bagryansky, E.I. Soldatkina, Influence of radial electric field on high-beta plasma confinement in the gas dynamic trap, Book of Abstracts of 33th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Rome, June 19 – 23, 2006, ECA, Vol.30I, P1.175
3. П.А. Багрянский, А.Л. Соломахин, Е.И. Солдаткина, Влияние пристеночной плазмы на МГД-устойчивость в газодинамической ловушке, Тезисы докладов XXXIV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2007, стр. 55
4. А.В.Аникеев, П.А.Багрянский, А.Д.Беклемишев, А.В.Киреенко, А.А.Лизунов, В.В.Максимов, С.В.Мурахтин, В.В.Приходько, А.Л.Соломахин, М.С.Чащин, Методы МГД-стабилизации двухкомпонентной плазмы в газодинамической ловушке, Тезисы докладов XXXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2008, стр. 33