

# Газодинамическая Ловушка

**В.В. Приходько и команда ГДЛ**

# Введение

**Исследования по теме ГДЛ направлены на обоснование проекта ГДМЛ и дальнейших термоядерных приложений магнитных ловушек открытого типа:**

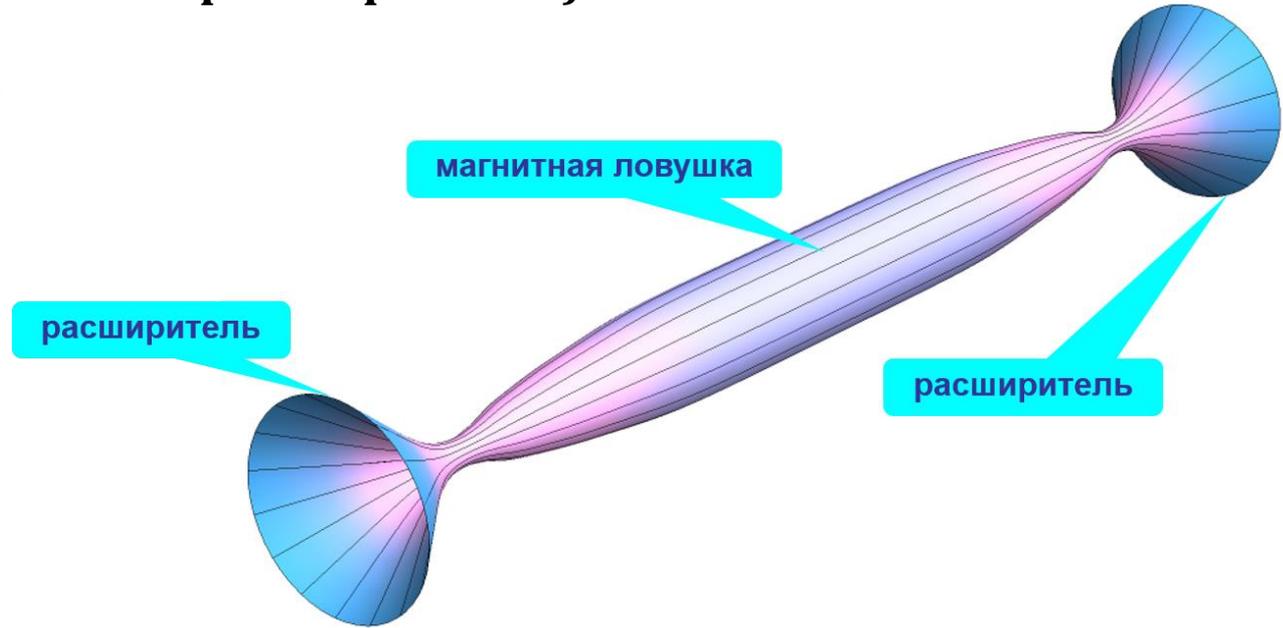
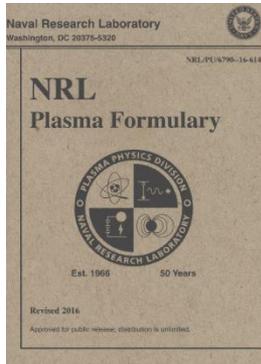
- мощных нейтронных источников,
- энергетических реакторов, способных работать с видами топлива, не содержащими тритий ( $d-d$ ,  $d-^3\text{He}$ ), а, возможно, и не производящими нейтронов в результате реакций синтеза ( $p-^{11}\text{B}$ ).

**Основные направления:**

- Изучение физических процессов в расширителе открытой ловушки, что необходимо для конструирования торцевых секций, способных обеспечить надежную термоизоляцию плазмы относительно продольных потерь в ГДМЛ и последующих установках реакторного класса.
- Дальнейшее увеличение относительного давления ( $\beta$ ) и развитие методов удержания плазмы с предельно высоким  $\beta$  с целью обоснования диамагнитного удержания.

# Главной особенностью и ключевой проблемой ловушек открытого типа является прямой контакт плазмы вдоль силовых линий с поглотителями (продольный транспорт тепла)

Оценим продольный поток энергии для ловушки открытого типа с параметрами:  
 $T_e = 10$  кэВ,  $L=10$  м,  $S = 2 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>



Воспользуемся классической теплопроводностью для столкновительной плазмы

( $\lambda_{\text{рассеяния}} \ll L_{\text{расширителя}}, L_{\text{пробки}}$ ):

$$\rightarrow q \propto T_e^{7/2}$$

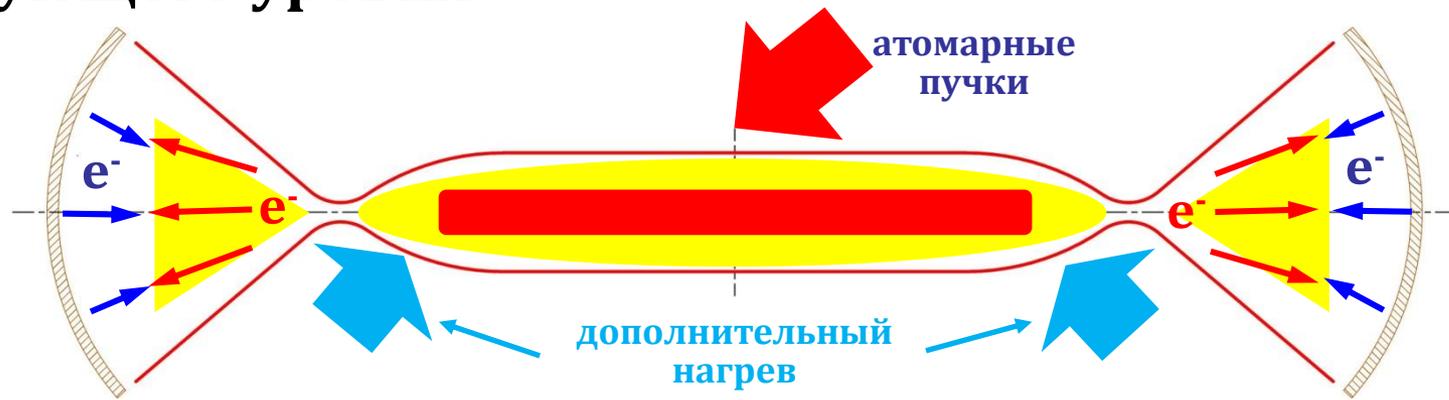
$$P_{\parallel} \sim 2 \text{ PW} !!!$$

Естественным способом обойти это фатальное препятствие является расширение магнитного потока в областях за магнитными пробками с целью обеспечить бесстолкновительный режим течения плазмы и кардинально снизить продольные потери энергии

В случае бесстолкновительного течения плазмы в расширителе ГДЛ:

$$\rightarrow q \propto T_e^{3/2}$$

# Продольная электронная теплопроводность – проблема следующего уровня



**Электронная компонента плазмы является основным переносчиком тепла вдоль силовых линий в силу высокой степени подвижности электронов.**

Аномальный продольный транспорт тепла возникает при беспрепятственном проникновении холодных электронов из расширителя в ловушку (замена горячих на холодные). Холодные электроны могут возникать за счет:

- эмиссии с поверхности поглотителя плазмы
- ионизации нейтрального газа в расширителе

**Ряд исследований указывает на существование эффективных механизмов, ограничивающих проникновение холодных электронов и подавляющих аномальный продольный теплоперенос:**

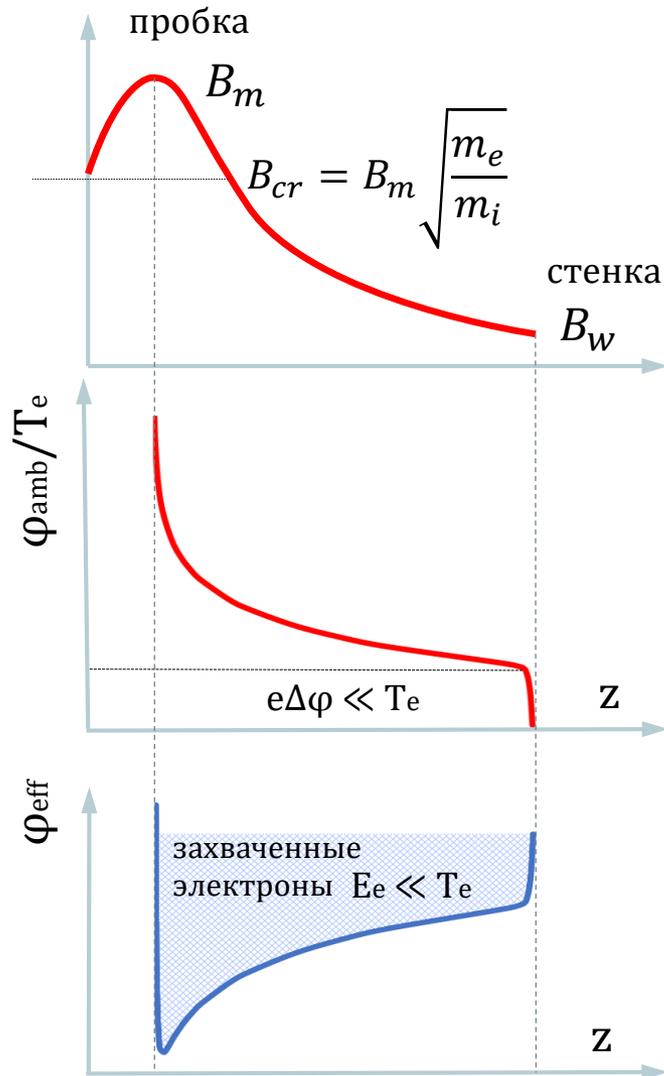
1. I.K.Konkashbaev, I. S. Landman and F.R.Ulinich, Zh. Exp. Teor. Fiz. 74(3), 956 (1978)

2. D.D.Ryutov, Fusion Sci. Technol. 47 (1T), 148 (2005)

3. A.V.Anikeev, P.A.Bagryansky, G. I.Kuznetsov, et al. , Plasma Physics Reports 25(10), 775 (1999)

4. D.I. Skovorodin, *Physics of Plasmas* **26**, 012503 (2019)

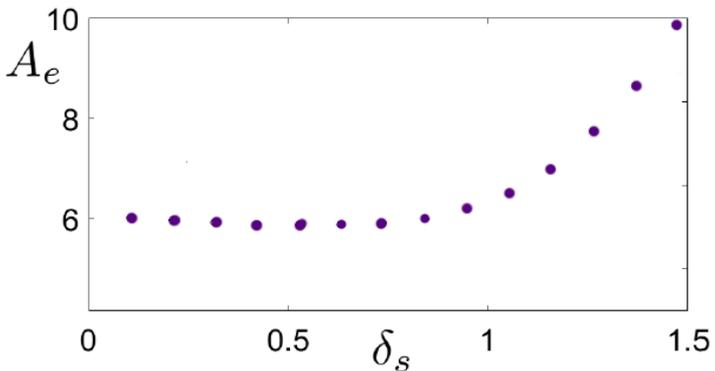
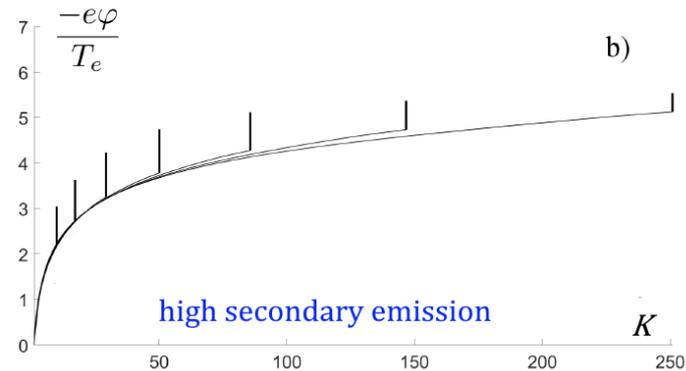
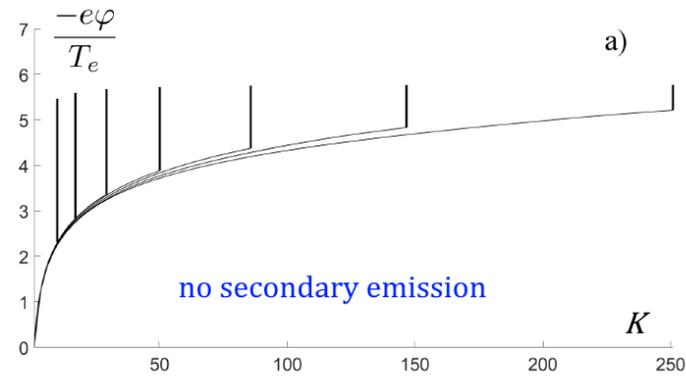
# Предсказания теории



- Потенциал спадает монотонно от пробки к стенке  $e\phi_{amb} \sim -T_e \ln R$ ;
- Эффективный потенциал – это сумма  $\phi_{eff} = e\phi_{amb} + \mu B$ ;
- Важен также скачок потенциала в Дебаевском слое вблизи стенки (если он достаточно велик, существует риск возникновения униполярных дуг);
- В области между пробкой и стенкой удерживается популяция холодных электронов, не проникающих в центр;
- Вторичная электронная эмиссия перестает играть роль в удержании плазмы при условии  $K = B_m/B_w \geq (m_i/m_e)^{1/2}$ ;
- Электронная теплопроводность ограничивается барьером амбиполярного потенциала, а минимальная энергия, выносимая из ловушки одной электрон-ионной парой порядка  $E_e \sim 8 T_e$ .

*D.D. Ryutov, Fus. Sci. Tech. 47, 148 (2005)*

# Новое в теории

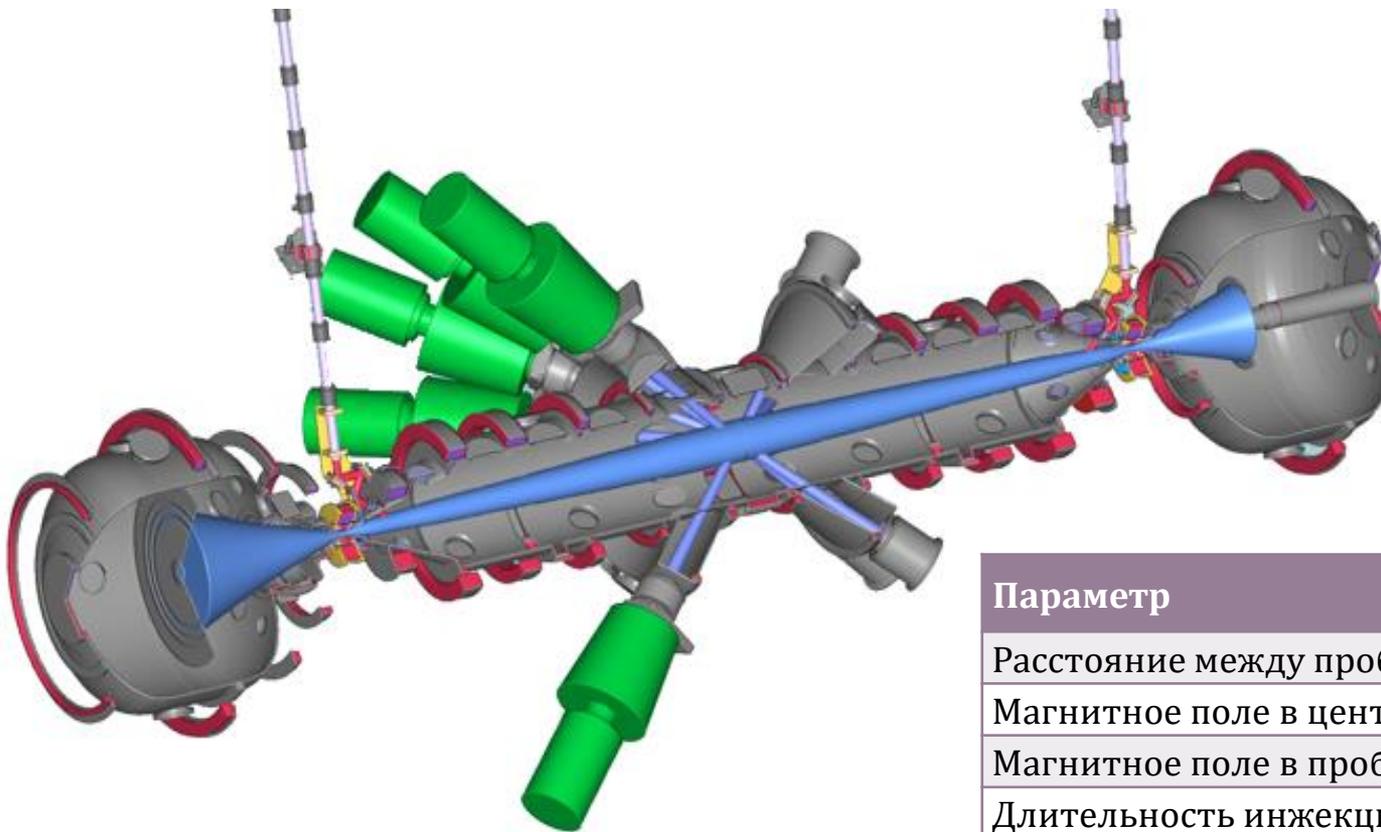


## Влияние вторичной электронной эмиссии

- Электрическое поле в Дебаевском слое ускоряет холодные электроны в сторону ловушки. Средний питч-угол таких электронов  $\alpha \sim (T_s / \Delta\phi_w)$ , где  $T_s$  – температура холодных электронов,  $\Delta\phi_w$  – скачок потенциала в Дебаевском слое. При больших  $\alpha$  электроны отражаются назад к стенке, поэтому чем меньше  $\Delta\phi_w$ , тем меньше влияние вторичной эмиссии на удержание плазмы в ловушке;
- При больших значениях  $K$  скачок потенциала в Дебаевском слое уменьшается, а значит, в этих областях вторичная эмиссия незначительна;
- Каждый холодных электрон, проникающий в ловушку, заменяет горячий электрон;
- Энергия, выносимая одной электрон-ионной парой  $\frac{j_Q}{j_i} = A_i \cdot T_i + A_e \cdot T_e$ ; величина  $A_e = \frac{j_{Qe}}{j_i \cdot T_e}$  почти постоянна в широком диапазоне значений коэффициента вторичной эмиссии.

*D.I. Skovorodin, Physics of Plasmas* **26**, 012503 (2019)

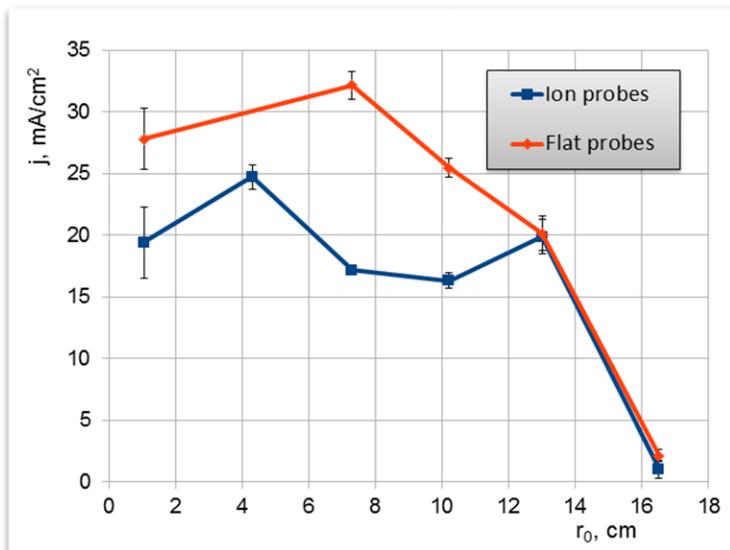
# Установка ГДЛ



Параметр	Значение
Расстояние между пробками	7 м
Магнитное поле в центре	0.36 Т
Магнитное поле в пробках	до 14 Т
Длительность инъекции	5 мс
Мощность инъекции	5 МВт
Мощность ЭЦР нагрева	700 кВт
Плотность мишенной плазмы	до $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Энергия быстрых ионов	9 кэВ
Относительное давление плазмы	60%
Электронная температура	250 ÷ 900 эВ

# Результаты 2018-2019 гг

## Вторичная эмиссия



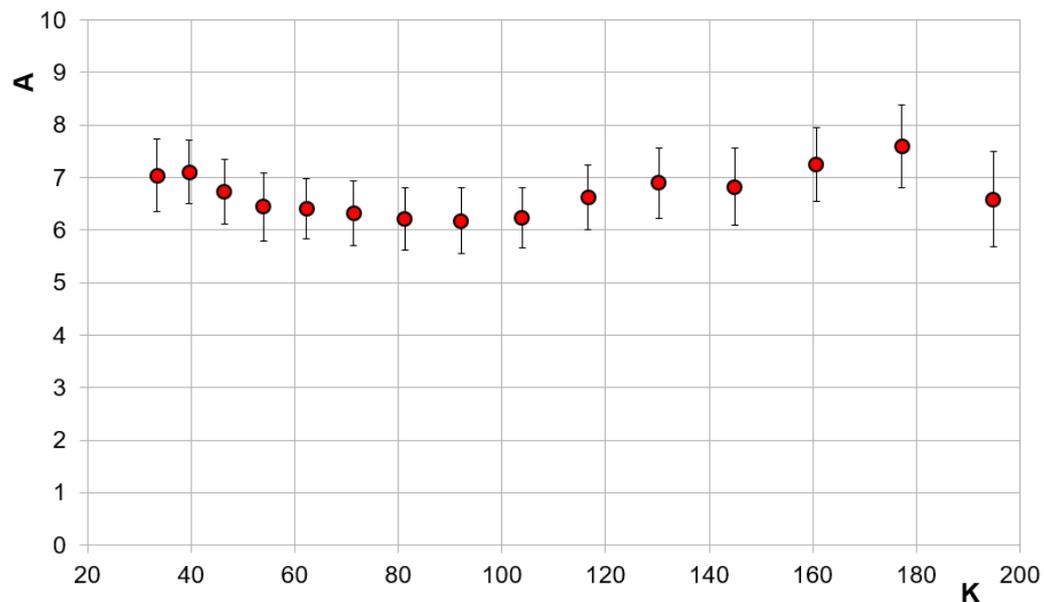
Плоские зонды, в отличие от ионных, отягощены вторичной электронной эмиссией, поэтому их данные можно использовать для оценки коэффициента вторичной эмиссии.

$$\frac{j_{flat}}{j_{ion}} = (1,5 \div 1,9)$$

## Средняя потеря энергии на электрон-ионную пару

$$\frac{j_Q}{j_i} = A_i \cdot T_i + A_e \cdot T_e$$

$A \approx A_e + 3/2 \approx 7.5$  – по Сковородину



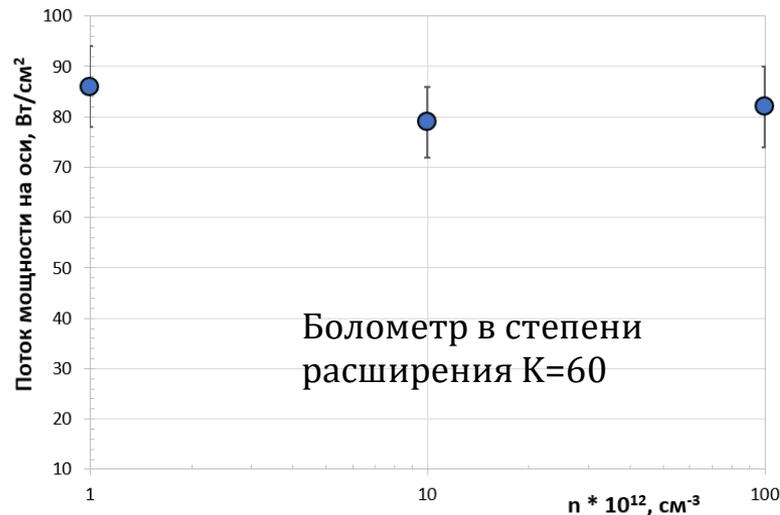
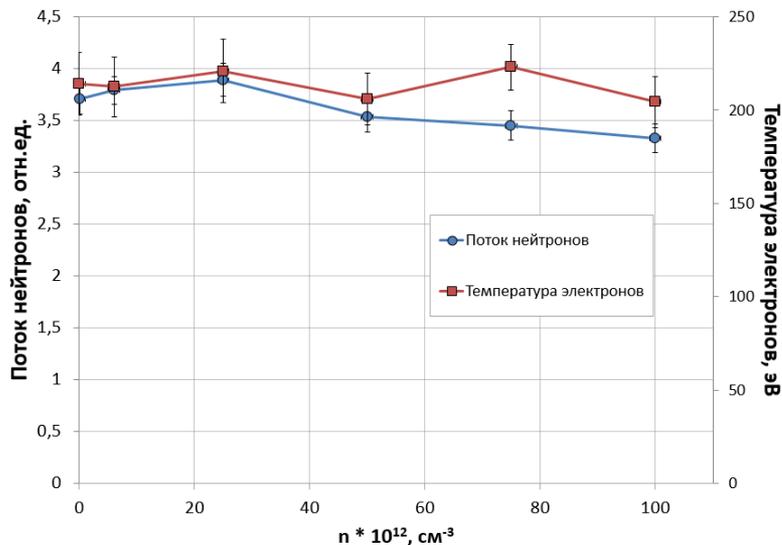
Средняя энергия, выносимая из ловушки одной электрон-ионной парой, нормированная на электронную температуру в зависимости от степени расширения магнитного поля  
Поток энергии измерялся пироэлектрическим болометром, поток ионов – сеточным зондом

# Проблема нейтрального газа – основное направление исследований 2018 года в области физики расширителя

*Цель – определить требования к системам вакуумной откачки ГДМЛ и последующих установок реакторного класса.*

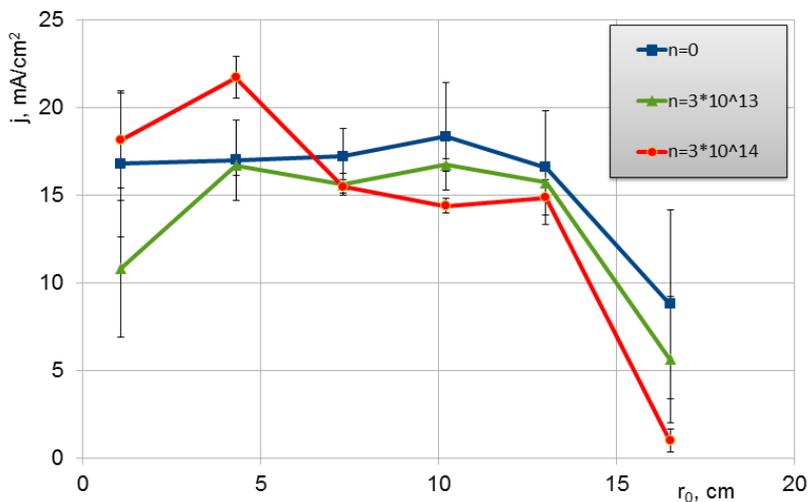
- Теория предусматривает течение плазмы в расширитель в режиме, близком к бесстолкновительному, что накладывает жесткие ограничения на вакуумные условия в расширителе. При этом неясно, насколько «хороши» должны быть эти условия и что происходит при наличии существенного количества нейтралов.
- Представляется вполне возможной ионизация остаточного газа, за счет которой популяция запертых электронов увеличится и начнет существенно влиять на плазму в ловушке. Очевидно также, что будет очень трудно удовлетворить требованиям высоких вакуумных условий в расширителе действующего реактора синтеза.
- Простые оценки показывают, что в области расширителя вблизи пробки ( $K=10$ , диаметр плазмы 15 см,  $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) вероятность ионизации нейтрального газа близка к единице, поэтому ток ионов на приемник плазмы должен существенно увеличиваться при наличии газа в расширителе.
- Оценка сверху: если каждая молекула газа отдает электрон при столкновении с плазмой и ток образовавшихся «холодных» электронов равен току ионов из ловушки  $\Rightarrow$  предельно допустимая плотность газа оказывается равной  $n_{\text{crit}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

# Параметры плазмы при различной плотности газа в расширителе



Болометр в степени расширения  $K=60$

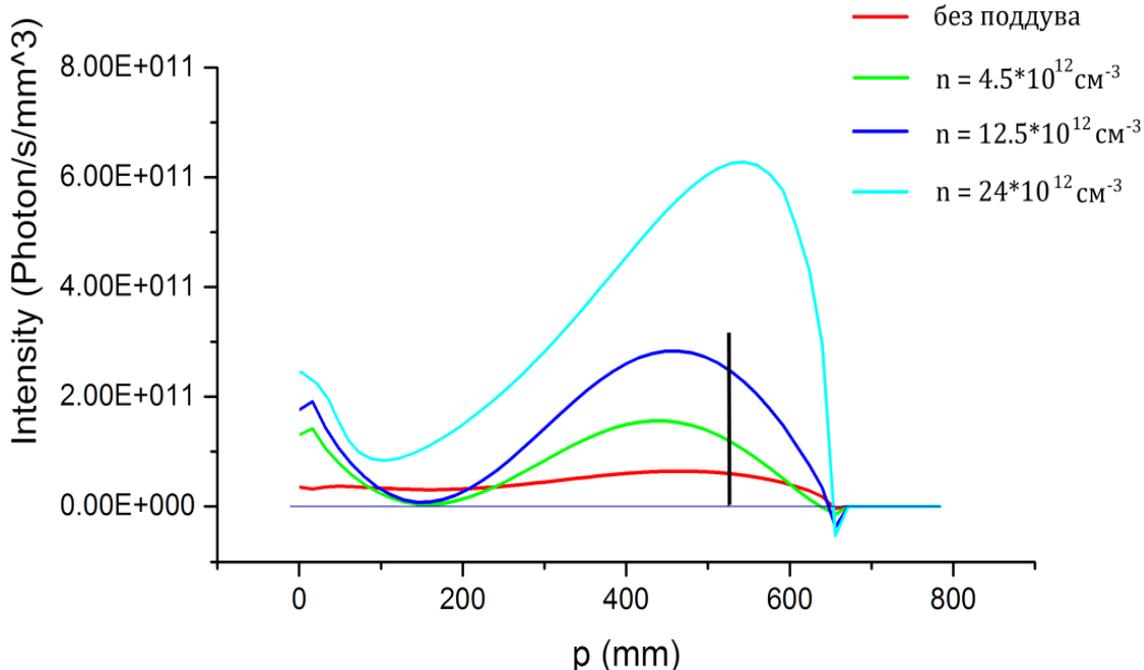
Плотность тока на плазмодриемник



$n = 0$  – давление остаточного газа в баке расширителя, равное  $10^{10} \text{cm}^{-3}$

Почему при плотности газа, в 100 раз превышающей оценку сверху, не происходит ухудшения удержания?

# Данные оптической томографии



Профили интенсивности излучения  $H_{\alpha}$  в момент времени  $t = 7.5$  мс при различном напуске газа в расширитель

В расширительном баке ГДЛ работает система оптической томографии, состоящая из 42 линий наблюдения, регистрирующих спектральную линию излучения  $H_{\alpha}$ . Она позволяет вычислять пространственные профили локальной интенсивности излучения.

Газ нагревается и вытесняется из плазмы за счет упругих столкновений с ионами  $H_2 + D^+ \rightarrow D^+ + H_2$  (0.5 эВ), сечение этого процесса  $\sigma = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$

Численная модель развивается Э.А. Федоренковым и А.Д. Беклемишевым

# Дальнейшие планы по изучению физики расширителя

Увеличение числа датчиков на плазмоприемнике до запланированного изначально количества (21 комплект из 3 датчиков);

Измерение хода потенциала плазмы вдоль оси расширителя;

Изучение влияние формы поверхности поглотителя плазмы на ее удержание (секционированный конический приемник плазмы, прозрачный для газа);

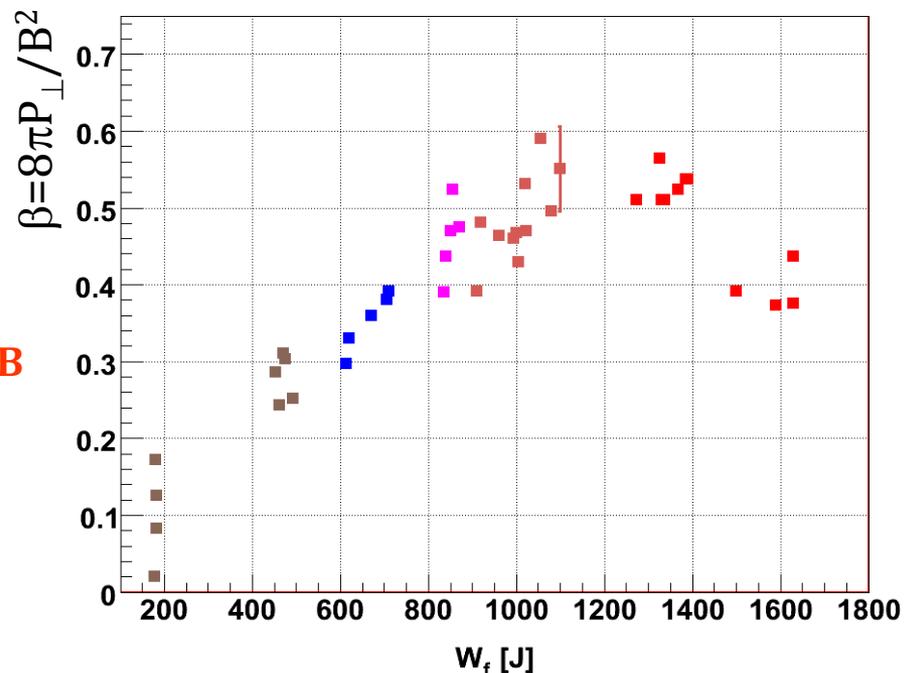
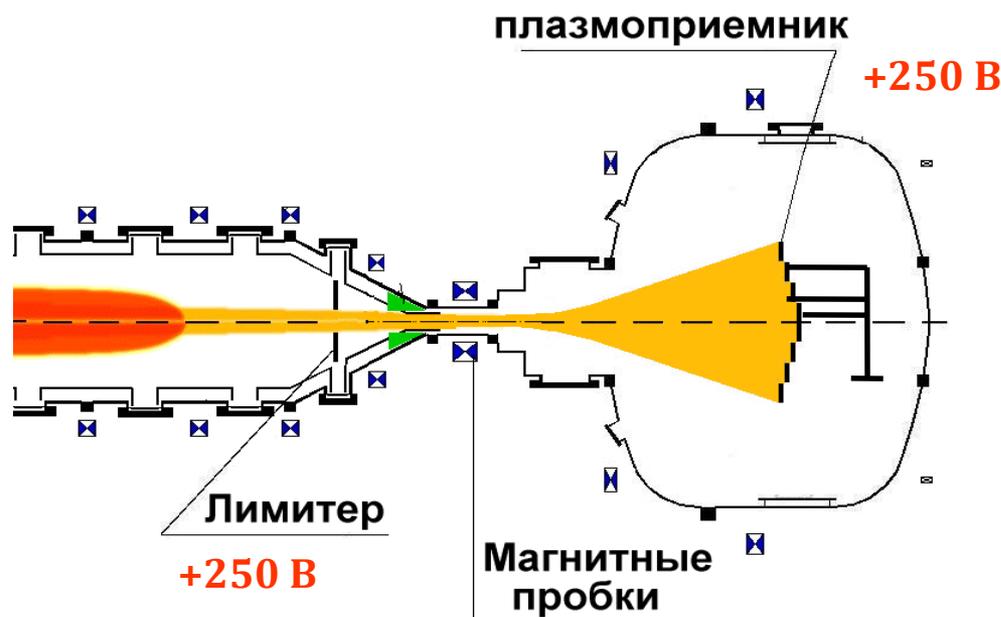
Измерение распределения потенциала в центральной плоскости ГДЛ при помощи пучка тяжелых ионов ( $\text{Xe}^+$ ).



# Заделы 2018 и планы 2019 по дальнейшему увеличению относительного давления ( $\beta$ ) и развитие методов удержания плазмы с предельно высоким $\beta$ с целью обоснования диамагнитного удержания

## Предшествующие результаты

(получены с использованием метода вихревого удержания)

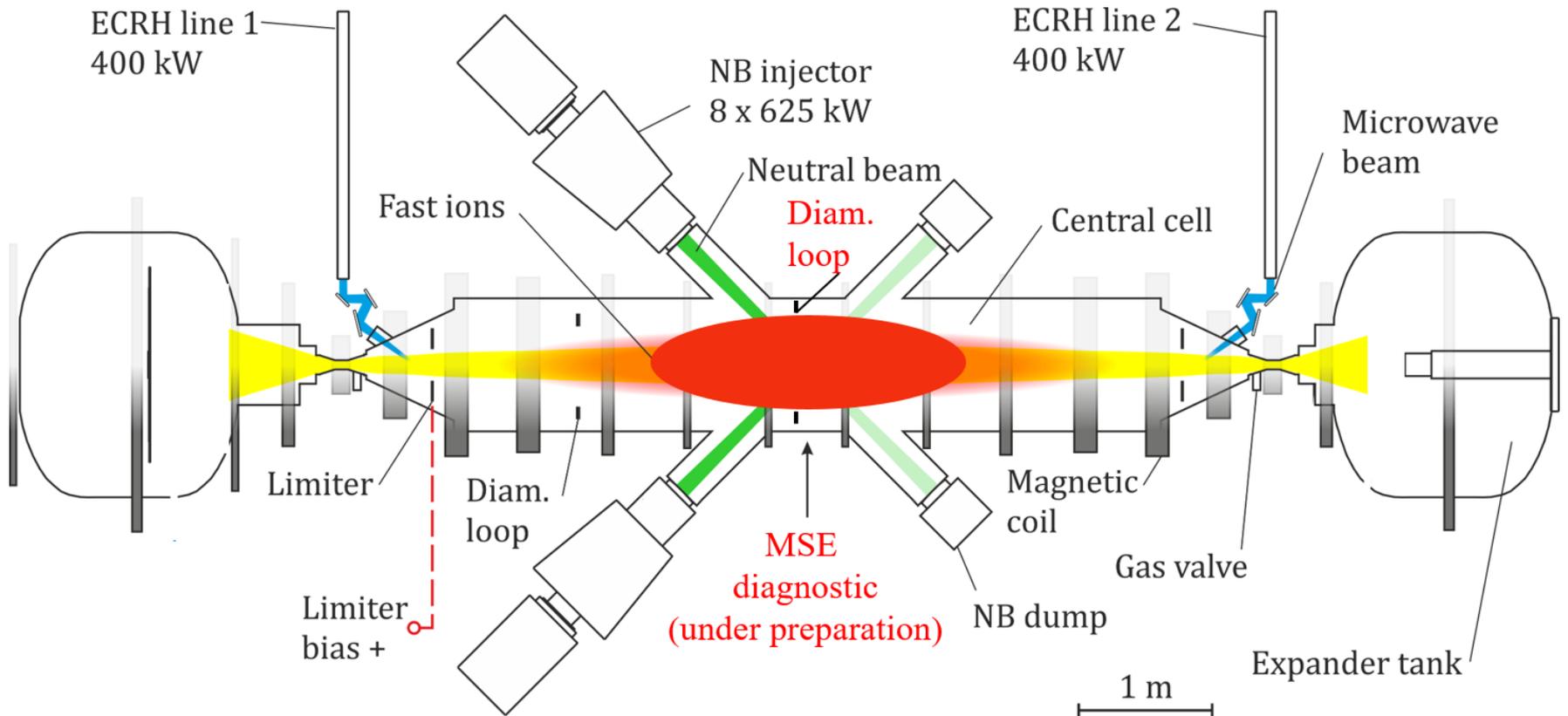


Зависимость  $\beta$  от полной энергии горячих ионов (измерено при помощи MSE диагностики в области остановки горячих ионов в центре плазменного столба)

*T.C. Simonen, A.Anikeev, P.Bagryansky, A.Beklemishev, A. Ivanov, A.Lizunov, V.V.Maximov, V.Prikhodko and Yu.Tsidulko, J. Fusion Energ. 29, 558 (2010)*

*P.A. Bagryansky, A.V.Anikeev, A.D.Beklemishev, A. S.Donin, A.A. Ivanov, M. S.Korzhevina, K.V. Zaytsev, Fusion Sci. Technol. 59 (1T), 31 (2011)*

# Эксперименты по увеличению $\beta$ : этап 1



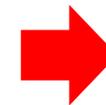
**Магнитное поле:**

**центр  
пробки**

**0.36 T → 0.26 T  
12 T → 10.6 T**



Объем,  
занимаемый  
горячими  
ионами,  
практически  
не изменяется

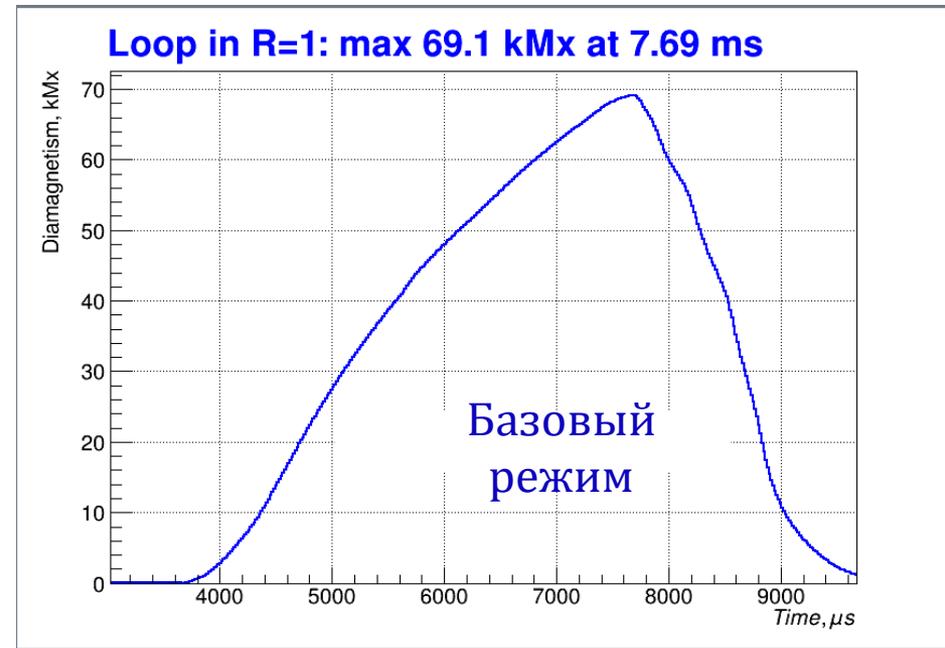
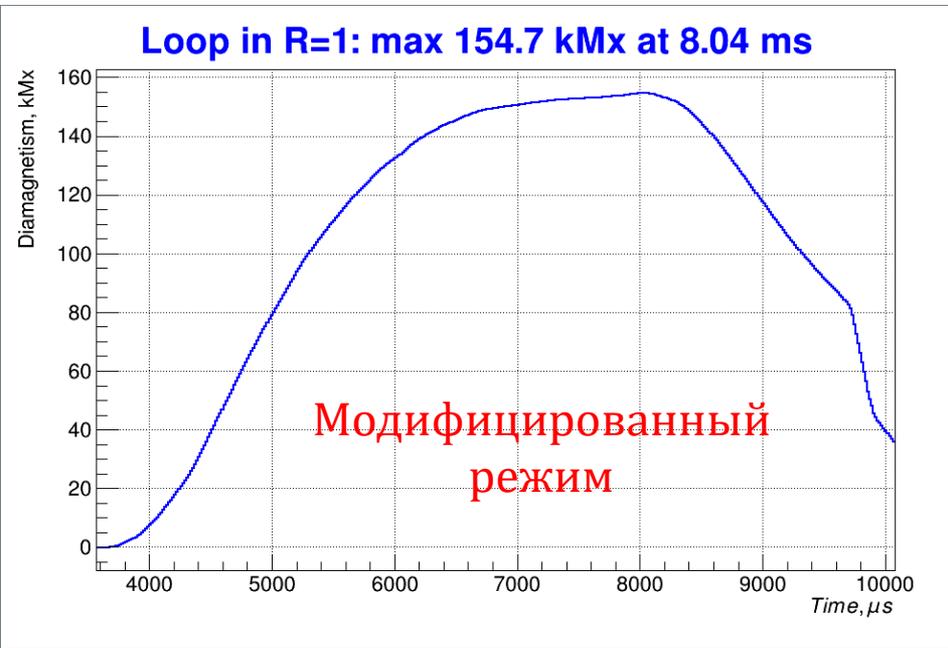


$$\frac{\beta_{pred}}{\beta_{bas}} \approx \left( \frac{0.36}{0.26} \right)^2 \approx 1.9$$

*Рост параметра  $\beta$*

**Пробочное отношение 35 → 41**

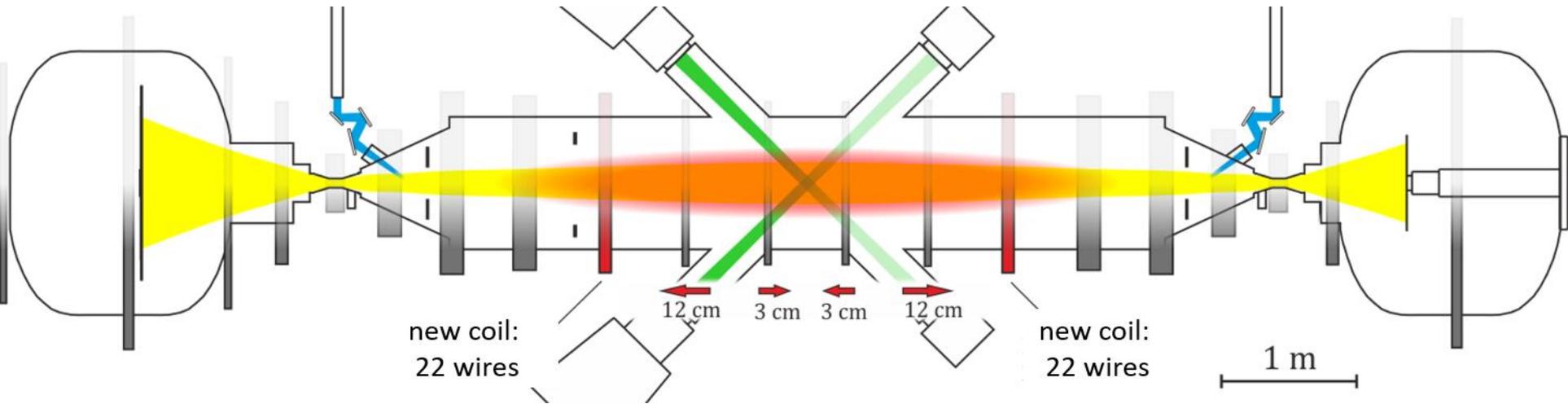
# Эксперименты по увеличению $\beta$ : этап 1



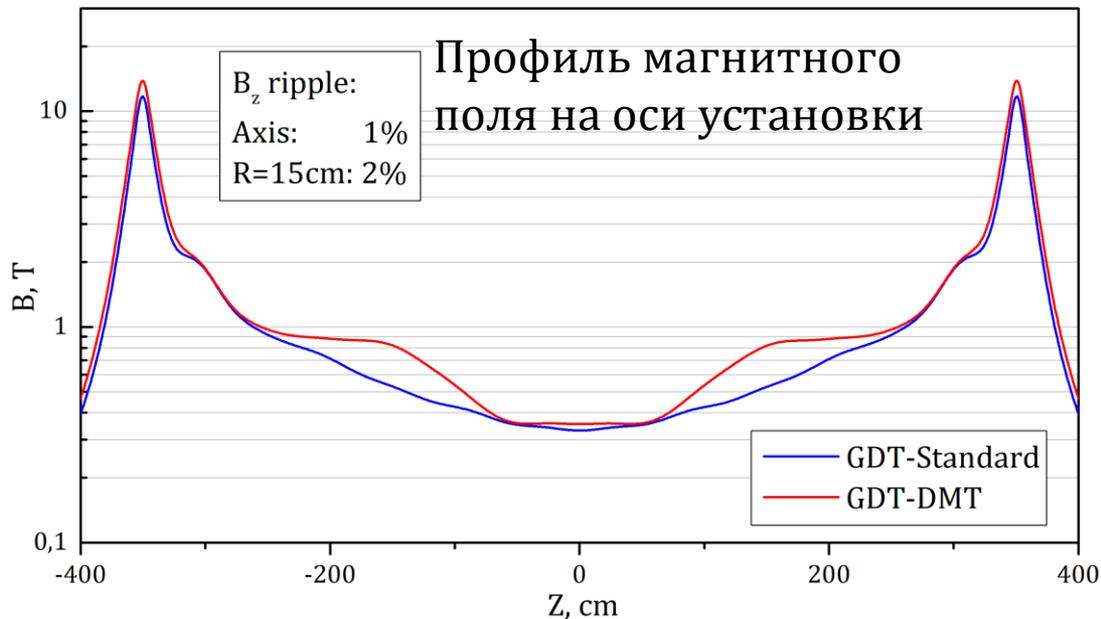
- Диамagnetизм плазмы в центральной плоскости удвоился
- Плотность плазмы, электронная температура и нейтронный выход остались практически неизменными

$$\frac{\langle \beta_{mod} \rangle}{\langle \beta_{bas} \rangle} \approx \frac{155}{69} = 2.25 \rightarrow \beta_{max\_bas} \approx 0.5 \rightarrow \beta_{max\_mod} - ?$$

# Эксперименты по увеличению $\beta$ : этап 2



Перемещение катушек основного соленоида



$$\beta_{\text{pred}} \approx 1.25 \cdot \beta_{\text{bas}}$$

«Широкий» ЭЦР нагрев

$$\beta_{\text{ICRH}} \approx 1.3 \cdot \beta_{\text{bas}}$$

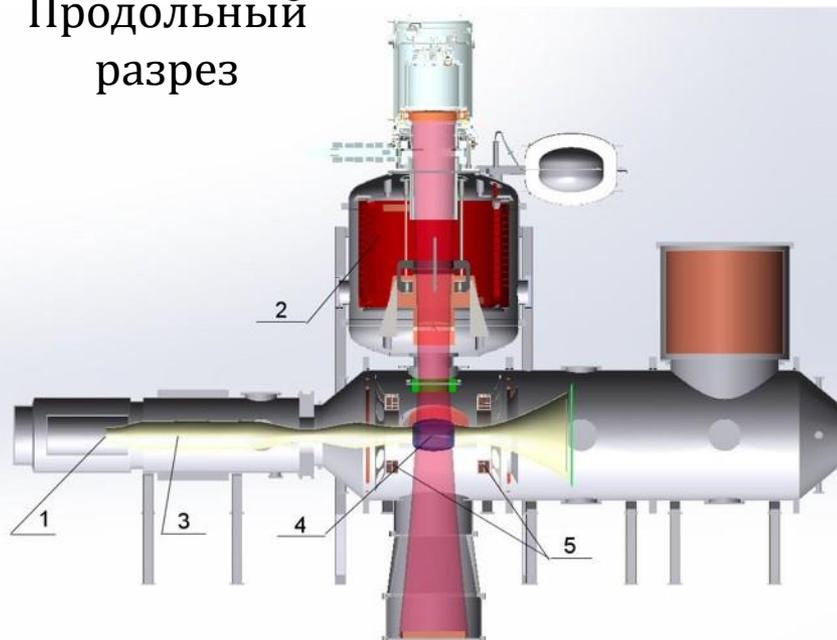
Оба метода одновременно:

$$\beta_{\text{pred}_\Sigma} \approx (1.5 \div 2) \cdot \beta_{\text{bas}}$$

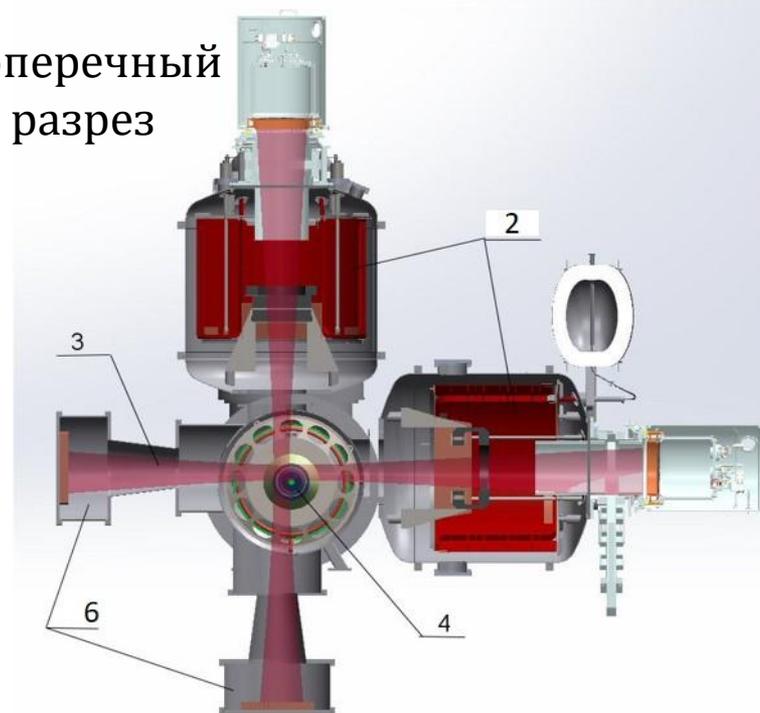
# Эксперименты по увеличению $\beta$ : этап 3 «КОТ»

КОТ = компактный аксиально-симметричный тороид

Продольный  
разрез



Поперечный  
разрез

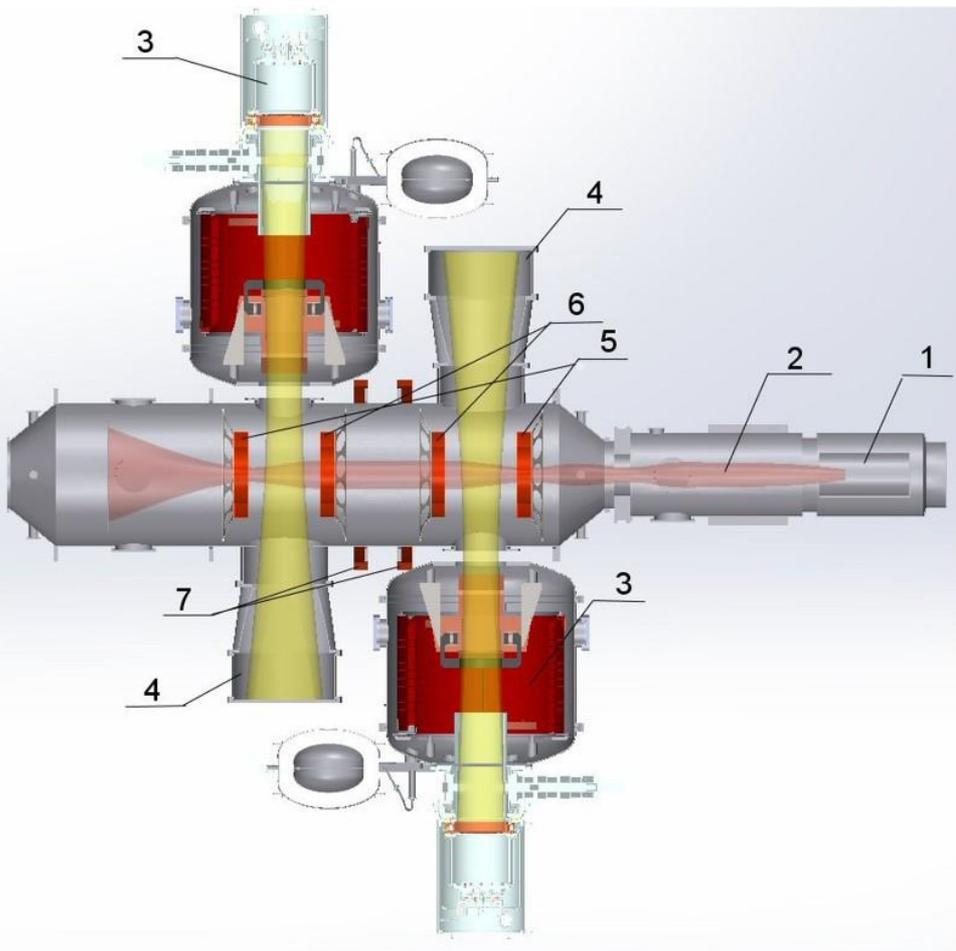


1 – генератор плазмы; 2 – атомарные инжекторы; 3 – «плазموпровод»; 4 – компактный плазмоид;  
5 – катушки; 6 – приёмник пучка

## Первая плазма планируется в 2020 году

Длина	– 6 м	Мишенная плазма:	Атомарные инжекторы:
Высота	– 5 м	$n_0$	2 модуля (C2-U)
Длина пробкотрона	– 0.6 м	$r_0$	Энергия частиц
$B_0$	– 0.2 Тл	$T_e$	– 15 кэВ
$B_0 / B_{\max}$	– 2		Полный ток
			– $2 \times 120$ экв. А
			Макс. плотность тока
			– 3.5 экв А/см <sup>2</sup>
			Длительность работы
			– 8 мс

# План В: решение основных проблем диамагнитного удержания



1 - генератор плазмы; 2 - «плазموпровод»; 3 - атомарные инжекторы; 4 - риемник пучка; 5,6,7 - магнитные катушки (необходимо квазиоднородное поле в центре).

- Удержание горячих ионов и формирование диамагнитного плазмоида
- МГД-устойчивость при высоком  $\beta$ :
  - баллонные моды;
  - желобковые моды
- Микронеустойчивости
  - АИС
  - DCLC
  - ...

# Установка КОТ



Поворотный магнит



Деталь конструкции эстакады

Производство на 19.02.2019		
Позиция	Трудоёмкость н/ч	Выполнено %
Система атомарной инжекции	17000	90
Питание инжекторов	-	Закуплены все комплектующие
Вакуумная камера	3500	80
Эстакада	2200	100
Магнитная система	2000	70
Питание магнитной системы	1000	50
Стеллажи конденсаторной батареи	1600	10
Плазменная пушка	1500	100
Питание пушки	-	Закуплены все комплектующие
Система геттерного напыления	2000	100
Питание пылителей	-	Закуплены все комплектующие
Система откачки	-	Закуплены все комплектующие
Система азотного питания	-	Ведутся проектные работы
Система газового питания	-	Закуплены все комплектующие

Система атомарной инжекции 17000 н/ч, 90%  
«Железо» КОТ 14000н/ч, 80%

# Заключение

- **Продолжается изучение физики расширителя, определяющей продольное удержание в открытых ловушках**
  - Проведены эксперименты по изучению влияния нейтрального газа в расширителе на удержание плазмы в центральной части ГДЛ;
  - Показано, что ключевые параметры плазмы остаются постоянными в широком диапазоне плотностей газа в расширителе  $n = (10^{10} \div 10^{14} \text{ см}^{-3})$ ;
  - Предположение о вытеснении газа из плазмы за счет упругих столкновений имеет экспериментальные основания и подтверждается предварительными оценками; ведется разработка соответствующей вычислительной модели;
- **Ведется подготовка к серии экспериментов по увеличению относительного давления плазмы в ГДЛ**
- **Продолжается строительство установки КОТ. Запланированные эксперименты будут направлены на моделирование удержания плазмы с относительным давлением порядка единицы, включая прямое моделирование режима диамагнитного удержания. Планируется получить первую плазму к 2020 году.**

**Спасибо за внимание!**