

Экспериментальная демонстрация винтового удержания плазмы в открытой ловушке

52 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС

А. В. Судников,

Команда установки СМОЛА

Содержание

- **Введение**
Открытые магнитные ловушки для удержания плазмы
Проект ГДМЛ: газодинамическая многопробочная ловушка
Многопробочное и винтовое удержание
- **Экспериментальная демонстрация винтового удержания**
Установка СМОЛА. Эксперименты с винтовыми пробками
Комбинация пробок различных типов
Удержание при слабой кулоновской столкновительности
- **Возможности для дальнейших исследований**
Винтовые секции ГДМЛ
Открытые вопросы и модернизация установки СМОЛА

Содержание

- **Введение**
 - Открытые магнитные ловушки для удержания плазмы
 - Проект ГДМЛ: газодинамическая многопробочная ловушка
 - Многопробочное и винтовое удержание
- **Экспериментальная демонстрация винтового удержания**
 - Установка СМОЛА. Эксперименты с винтовыми пробками
 - Комбинация пробок различных типов
 - Удержание при слабой кулоновской столкновительности
- **Возможности для дальнейших исследований**
 - Винтовые секции ГДМЛ
 - Открытые вопросы и модернизация установки СМОЛА

Открытая ловушка

Открытые ловушки: магнитное удержание плазмы в осесимметричном (или близком к тому) поле.

Плюсы:

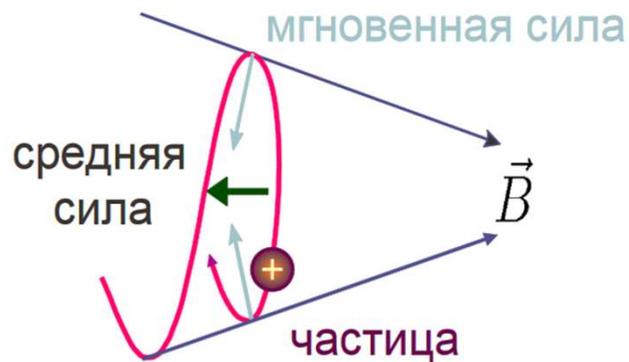
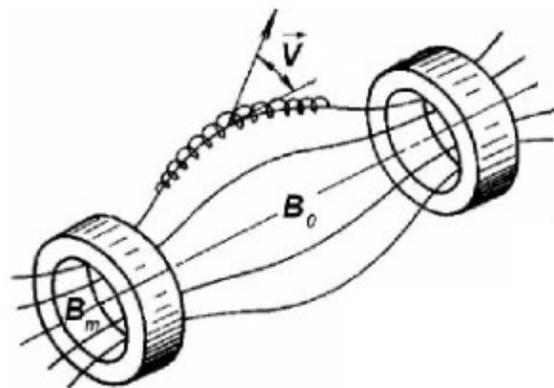
- Простота и масштабируемость конструкции;
- высокое отношение давления плазмы к давлению магнитного поля;
- естественный канал удаления примесей и продуктов термоядерных реакций;
- возможность прямого преобразования энергии плазмы в электричество.

Минусы:

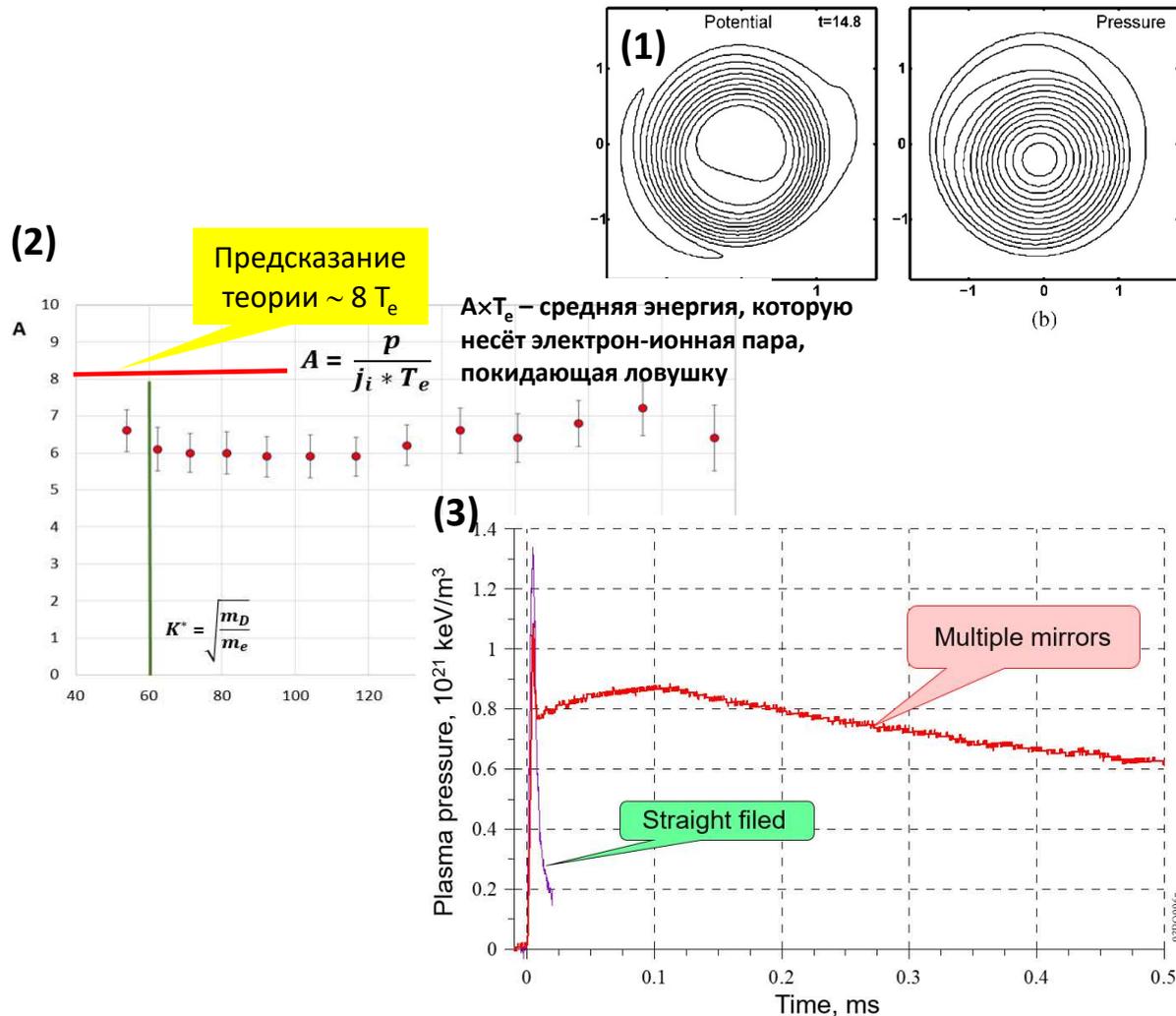
- продольные потери частиц и энергии
- неустойчивости (*достаточно долго эти две проблемы многими считались неразрешимыми*);
- вложено меньше усилий, чем в токамаки.

Способы снижения продольных потерь:

- создание электростатических потенциальных барьеров в дополнительных концевых ячейках (амбиполярные ловушки, $\lambda \gg L$);
- «трение» между потоком плазмы и модулированным магнитным полем (многопробочные ловушки, $\lambda \sim h \ll L$);
- формирование областей с вытесненным магнитным полем (диамагнитные ловушки и FRC, различные λ/L);
- увеличение длины ловушки.



Предпосылки для современных работ



Проблемы с устойчивостью и теплопроводностью были решены, достигнуты $T_e > 1$ кэВ:

1. Вихревое удержание: нелинейное насыщение амплитуды желобковых неустойчивостей на безопасном уровне за счёт дифференциального вращения внешних слоёв плазмы.
2. Подавление продольной электронной теплопроводности за счёт создания потенциального барьера для холодных электронов в расширителе;
3. Многопробочное удержание возможно при низкой плотности плазмы за счёт аномальной столкновительности (рассеяния ионов на турбулентных колебаниях в плазме).

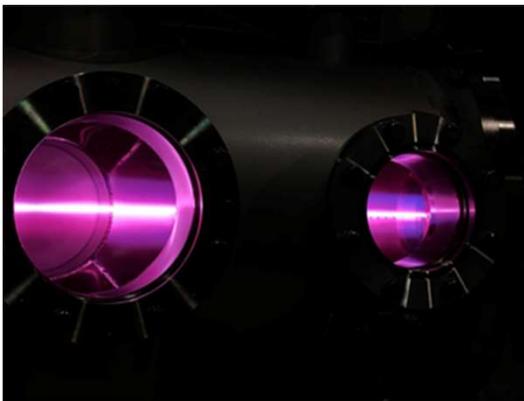
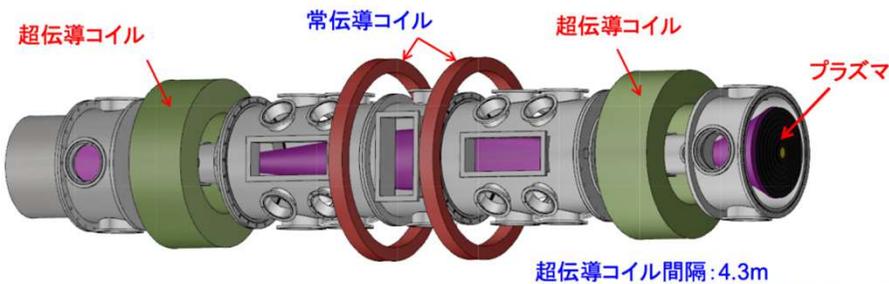
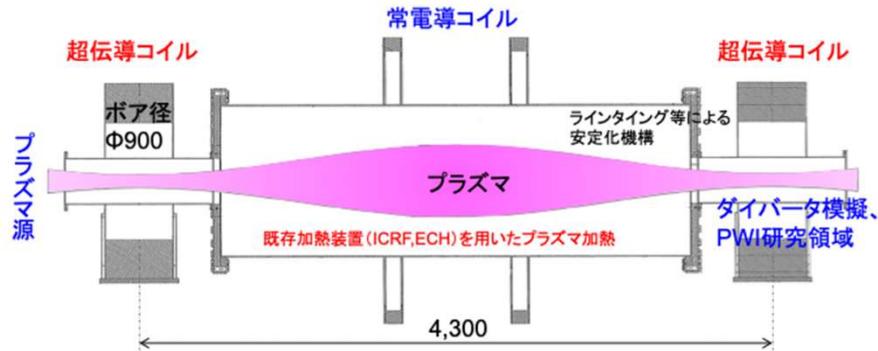
T. C. Simonen. 2016 *J Fusion Energ* **35**, 63.

(1) A.D. Beklemishev, et al. 2010 *Fusion Sci. Technol.* **57**, 351.

(2) D. Skovorodin. 2019 *Phys. Plasmas* **26** (1), 012503,
I.S. Abramov, et al. 2019 *Nucl. Fusion* **59**, 106004,
E. Soldatkina, et al. 2017 *Phys. Plasmas* **24**, 022505,
E.I. Soldatkina, et al. 2020 *Nucl. Fusion* **60**, 086009.

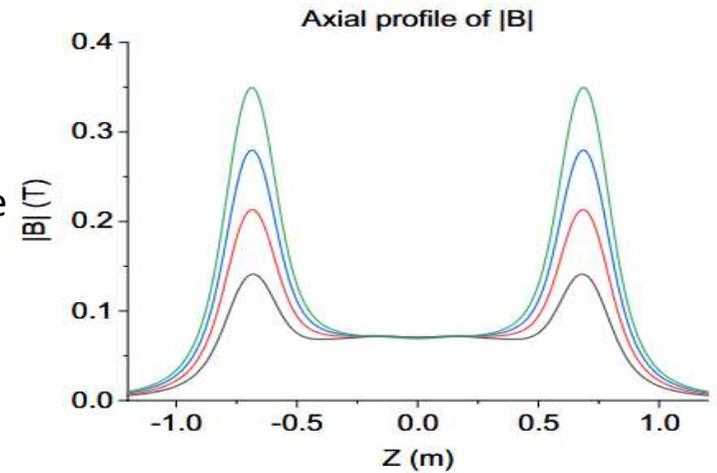
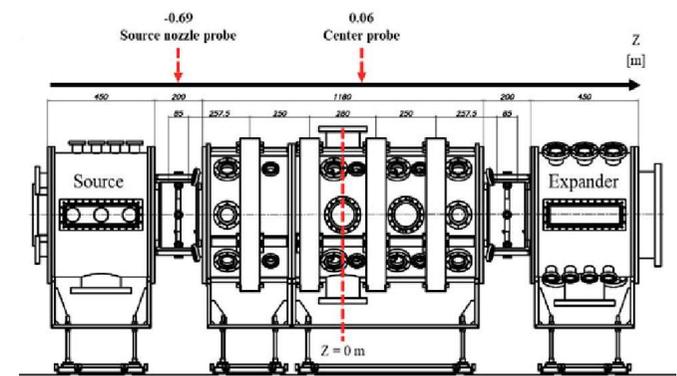
(3) V.S. Koidan et al. 2005 *Fusion Sci. Technol.* **47**, 35.

Действующие открытые ловушки с газодинамическим течением



← Pilot Gamma PDX-SC
 Первая плазма: 2023
 Univ. of Tsukuba, Япония
 Задачи: исследование устойчивости, ИЦР-нагрева, взаимодействия плазмы с поверхностью.

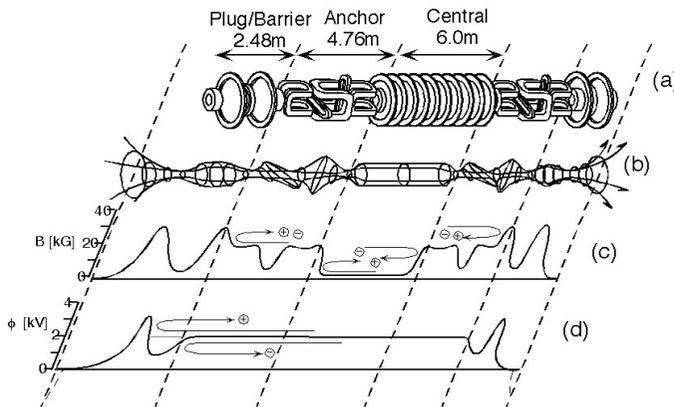
Kaimir →
 Первая плазма: 2023
 KAIST, Корея
 Задачи: исследование устойчивости, обучение



M. Sakamoto, et al. OS'23 Conference.

D. Oh, et al. 2024 *J. of Plasma Phys.*, **90** (2), 975900202.

Действующие открытые ловушки с кинетическим течением

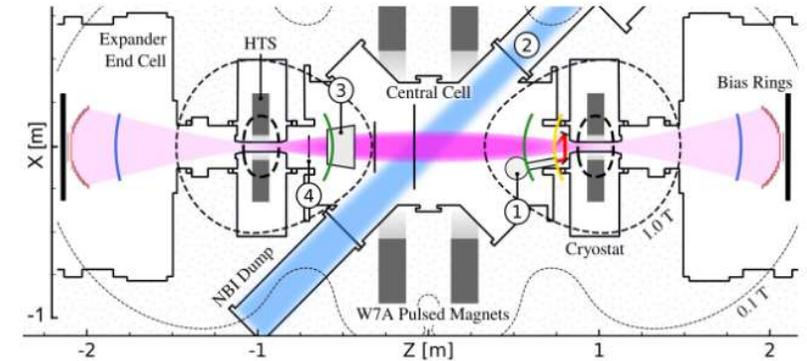


← Gamma-10

Первая плазма: 1983

Univ. of Tsukuba, Япония

Задачи (на сегодняшний день):
взаимодействие плазмы с
поверхностью, ВЧ-нагрев



WHAM →

Первая плазма: июль 2024

UW-Madison / Reolta Fusion, США

Задачи: демонстратор ряда
технологий для реактора на
основе открытой ловушки

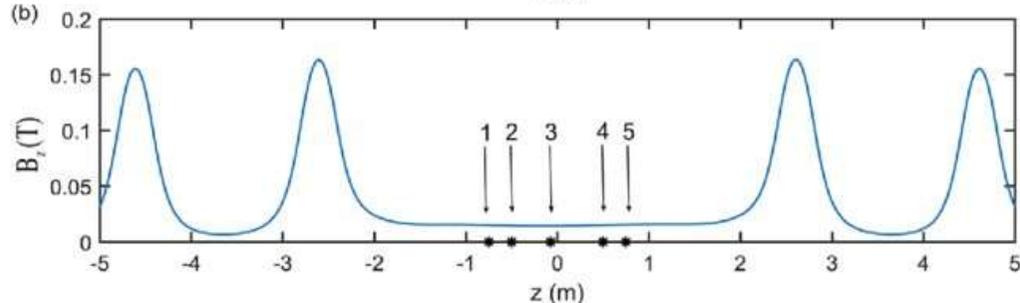
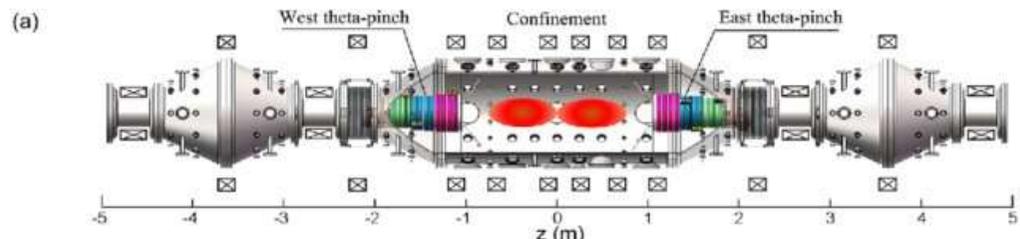
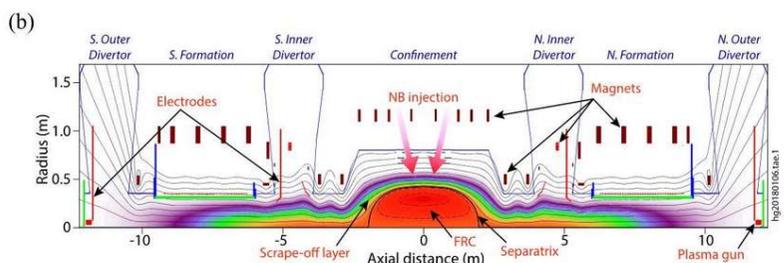
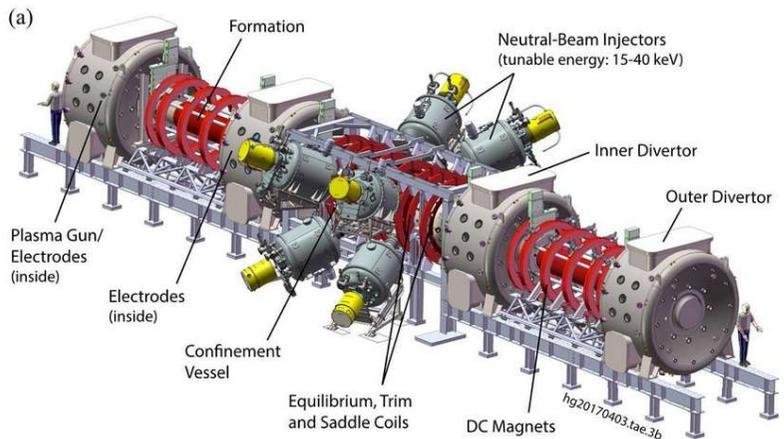


Y. Nakashima, et al. 2016. *AIP Conf. Proc.*, **1771**, 020002

D. Endrizzi, et al. 2023. *J. of Plasma Phys.*, **89** (5), 975890501

C. B. Forest, et al. 2024. *J. of Plasma Phys.* **90** (1), 975900101.

Действующие открытые ловушки: пинчи с обращённым полем



↑ **KMAX-FRC**

USTC, Китай

Первая плазма: ~2017

Задачи: исследование устойчивости, обучение

← **C2W / Norman**

TAE Tech., США

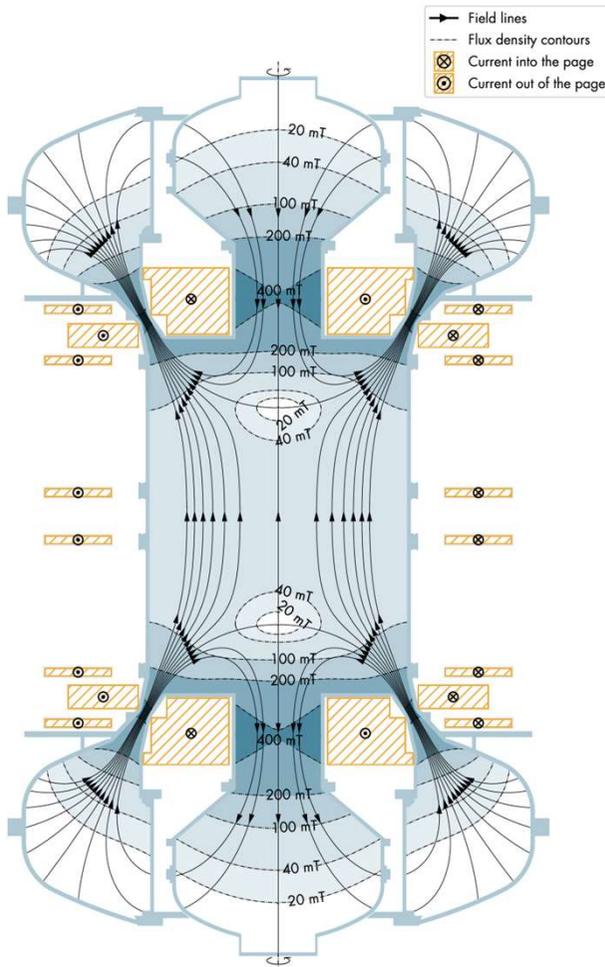
Первая плазма: июль 2017

Задачи: демонстратор ряда технологий для реактора на основе открытой ловушки.

H. Gota, et al. 2021. *Nucl. Fusion*, **61**, 106039.

Hui Liao et al. 2022. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **64**, 115003.

Действующие открытые ловушки: прочее



← N1

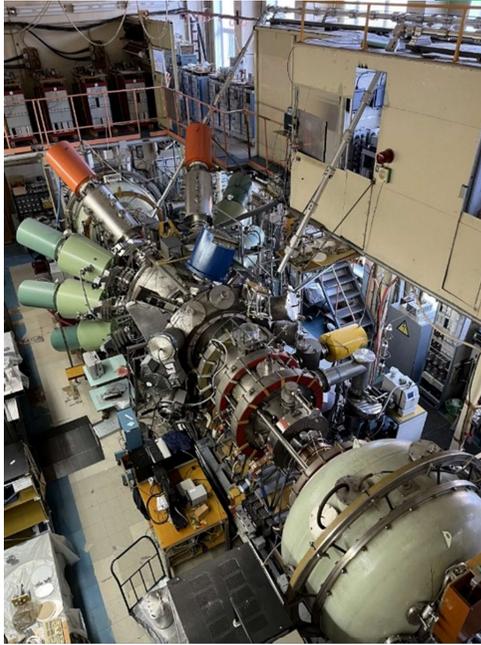
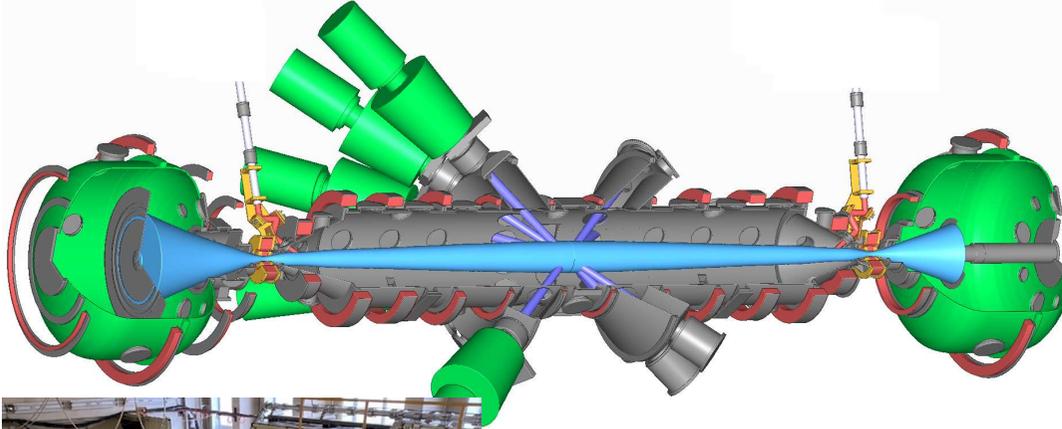
KTH / Novatron Fusion, Швеция

Первая плазма: январь 2025

Задачи: демонстрация устойчивости
специфической магнитной конфигурации.

Jan Jäderberg, et al. 2024 arXiv:2310.16711v3,

Действующие открытые ловушки ИЯФ



← ГДЛ

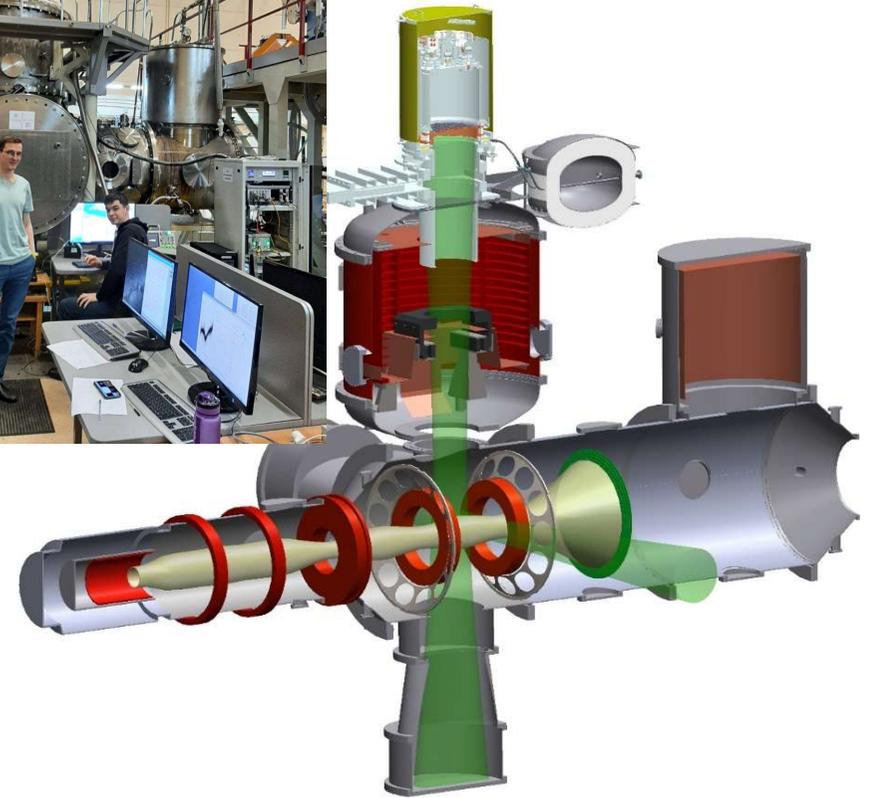
Первая плазма: 1986

Задачи: устойчивость плазмы,
физика расширителя,
пучковый нагрев, ЭЦР-нагрев

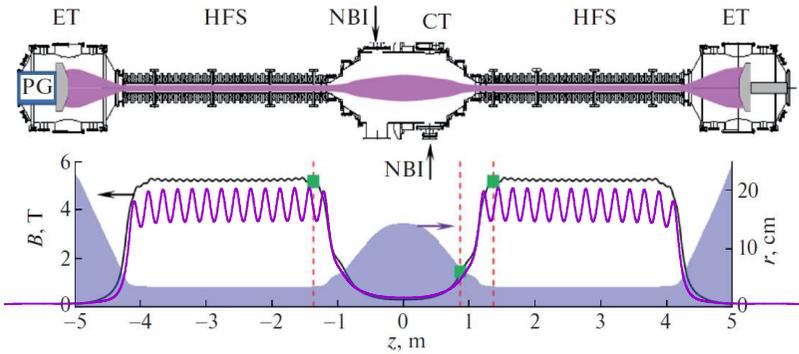
КОТ →

Первая плазма: 2020

Задачи: формирование,
стабилизация и удержание
плазмоида с $\beta \rightarrow 1$



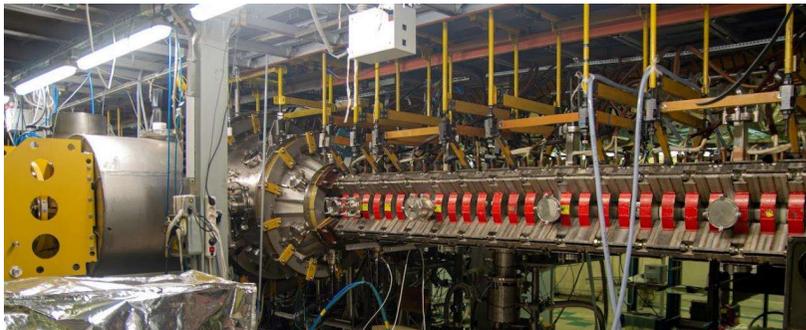
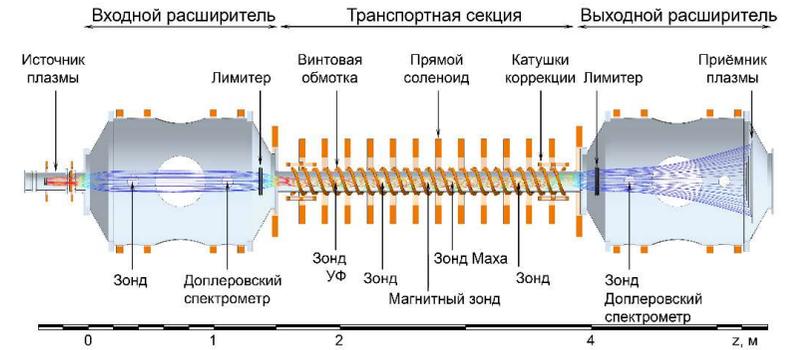
Действующие открытые ловушки ИЯФ: многопробочное удержание



← ГОЛ-НВ

Первая плазма: 2018

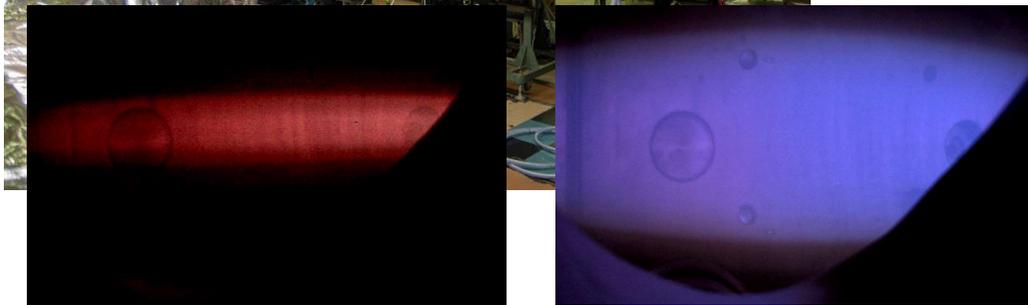
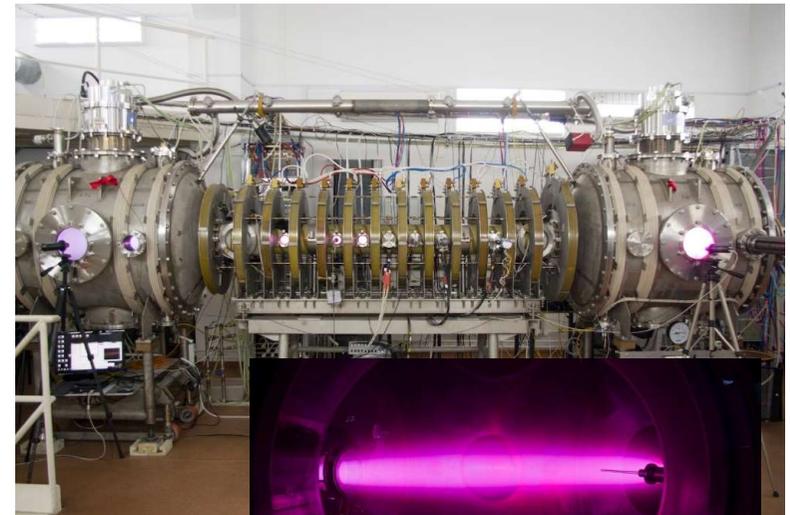
Задачи: многопробочное удержание плазмы, истекающей из центральной ловушки.



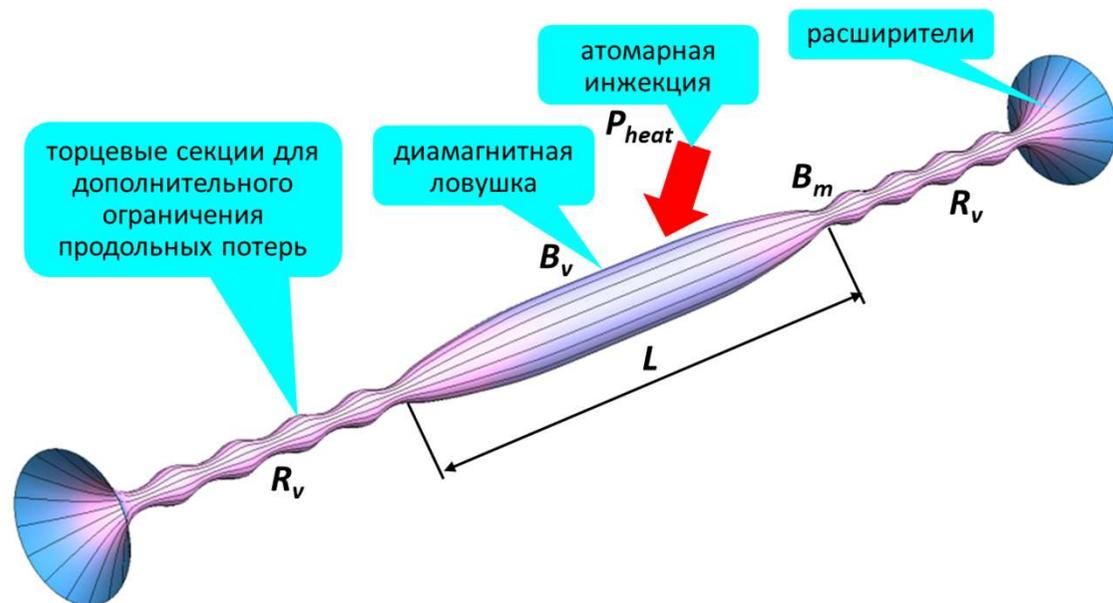
СМОЛА →

Первая плазма: 2017

Задачи: демонстрация винтового удержания.



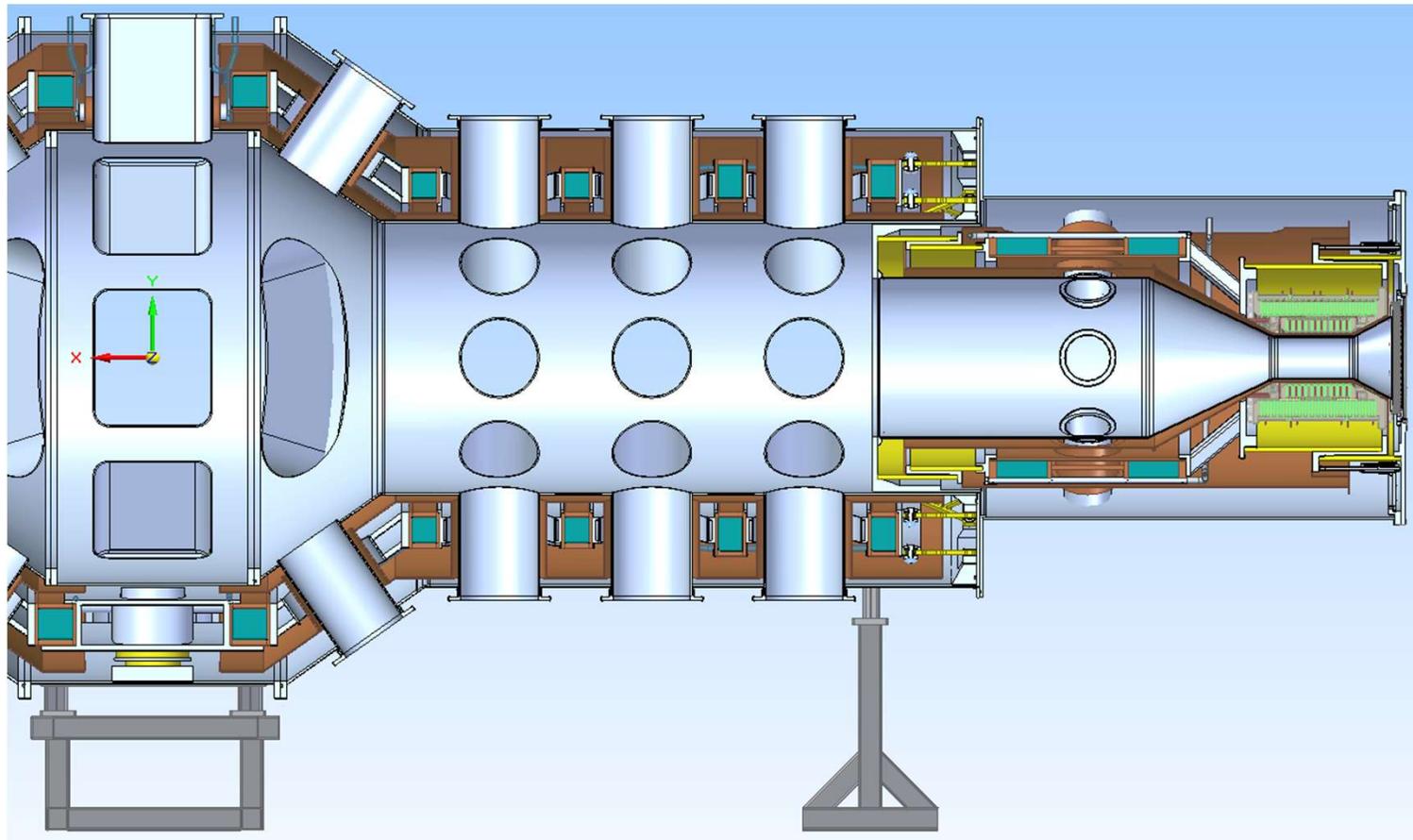
Газодинамическая многопробочная ловушка



- ИЯФ в рамках термоядерной программы создаёт проект газодинамической многопробочной ловушки ГДМЛ.
- ГДМЛ: диамагнитное удержание + сильные пробки + многопробочные секции.
- В газодинамическом режиме (без подавления продольных потерь): $T_i = 1\text{--}2$ кэВ, $T_e = 1$ кэВ, $n_i = (2.2\text{--}6.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $n_f = (1.6\text{--}4.6) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
- В полной конфигурации продольные потери частиц и энергии из области удержания должны быть многократно подавлены.

Д. И. Сквородин [и др]. 2023. *Физика плазмы*, **49** (9), 850
П. А. Багрянский. Семинар ГК «Росатом» 25 октября 2024

Газодинамическая многопробочная ловушка



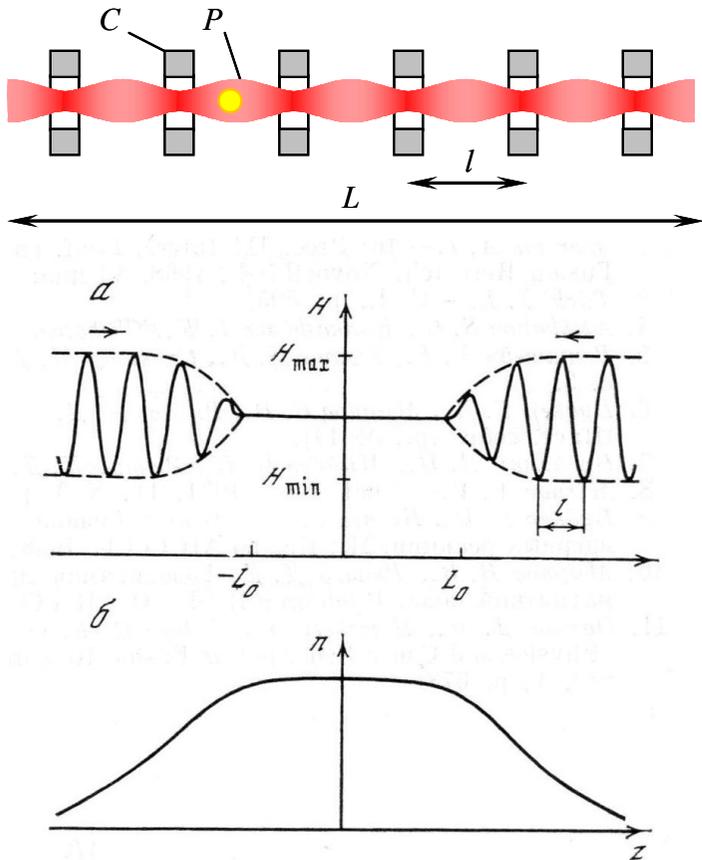
Параметр	Значение
Расстояние между пробками	~10 м
Радиус плазмы	10 – 30 см
Магнитное поле:	
в центре	0 – 1.5 Тл
в пробках	~12 (20) Тл
Атомарная инжекция (H^0)	
суммарная мощность	~ 20 МВт
длительность работы	~1 с
мощность	~5 МВт
длительность работы	~100 с
энергия нейтралов	30 кэВ
Дополнительный ЭЦРН:	
частота	170 ГГц
суммарная мощность	4 МВт
длительность импульса	~10 с

Д. И. Сковородин [и др]. 2023. *Физика плазмы*, **49** (9), 850
 П. А. Багрянский. Семинар ГК «Росатом» 25 октября 2024

20.03.2025

А. В. Судников. Винтовое удержание в открытой ловушке

Многопробочное удержание плазмы



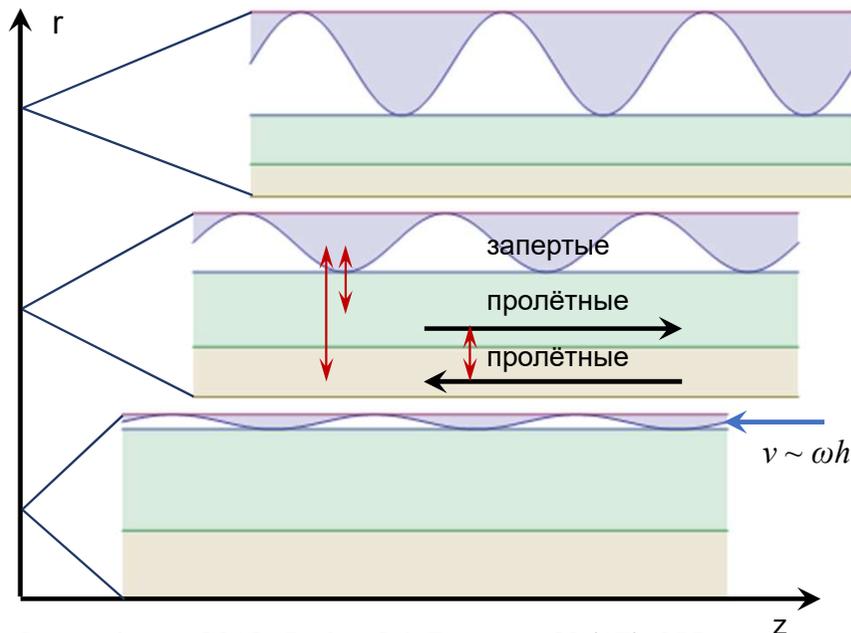
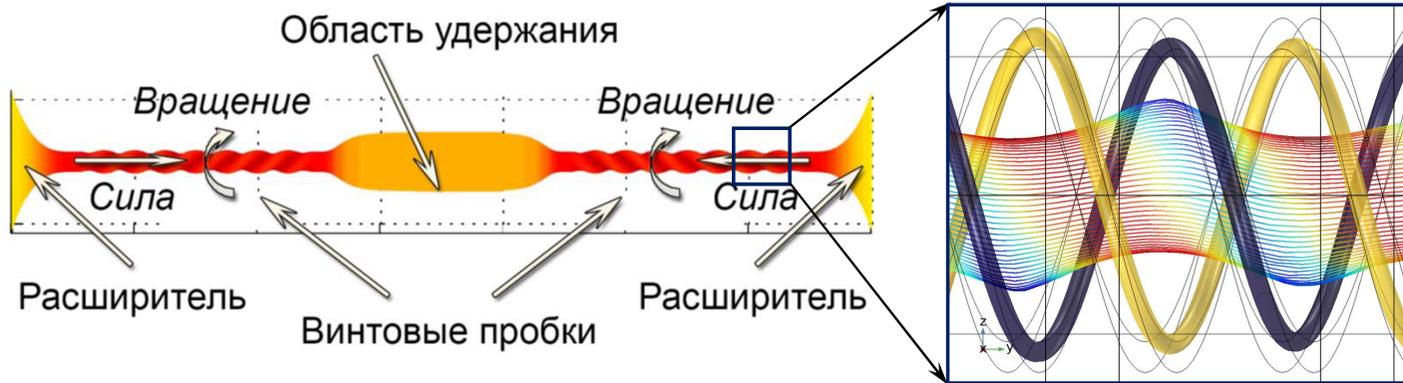
- Рассеяние и отражение от локальных пробок создаёт обратный поток частиц, возникает «трение» — передача импульса от потока к магнитному полю.
- За счёт этого снижается продольная скорость течения и поток частиц.
- В очень длинной системе с $N \gg 1$ предельный коэффициент подавления потока равен N .
- Оптимальный режим работы: $v^* = \lambda/h \sim 1$.
- В исходных работах звучало предложение о движущихся пробках.

Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖЭТФ, 1971, 14, 320.

Logan B. G., et al. // Phys. Rev. Lett., 1972, 28, 144.

Будкер, Г. И. Собрание трудов. - М. : Наука, 1982. - С. 113-118

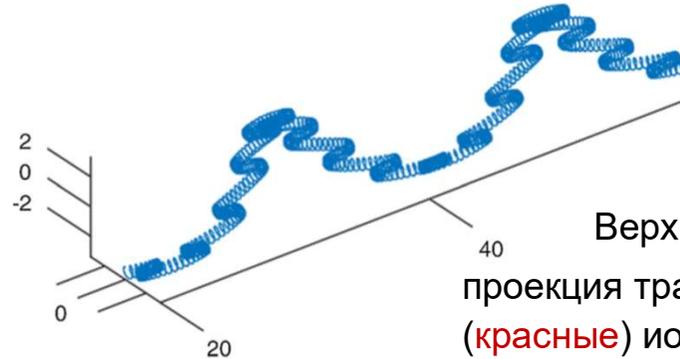
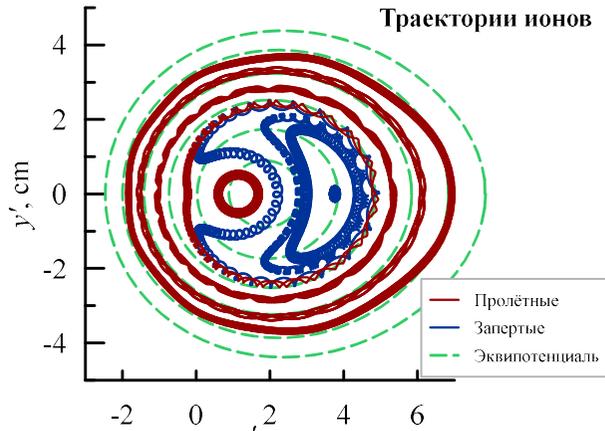
Идея динамического многопробочного удержания



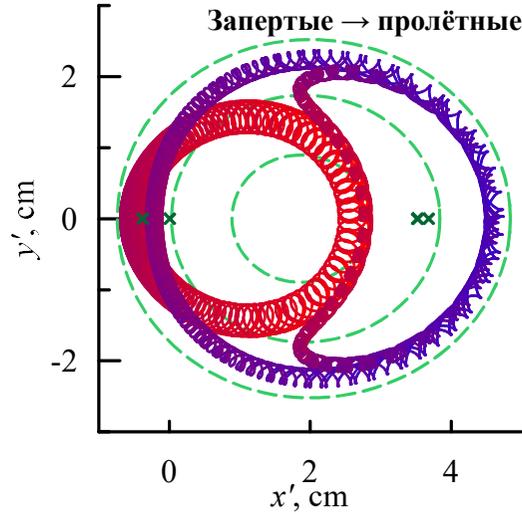
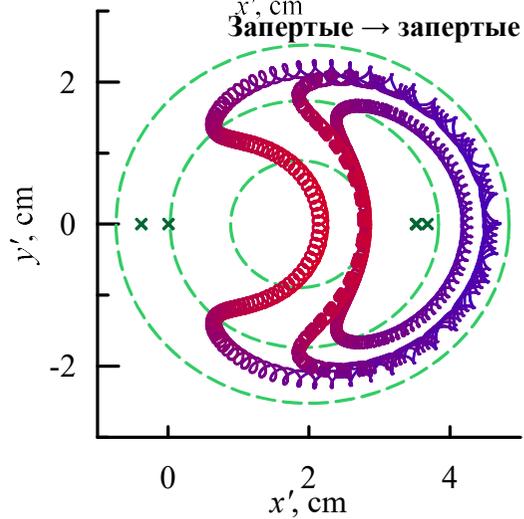
A. D. Beklemishev. 2013. *Fusion Sci. Technol.*, **63** (1T), 355.

- Развитие метода многопробочного удержания. Эффективнее классического многопробочного удержания
- Магнитное поле с винтовой симметрией. Продольная и радиальная компоненты сравнимы
- Есть модуляция вдоль каждой силовой линии
- Плазма вращается в $E \times B$ полях. Ось, как правило, отрицательна
- Пробка движется в системе отсчёта вращающейся плазмы
- Передача импульса: пробка \rightarrow запертые частицы \rightarrow пролётные частицы
- Доля запертых частиц зависит от радиуса. Их скорость зависит от скорости вращения и шага винта

Движение ионов в винтовом поле



Траектории запертых частиц схожи с банановыми.



Нижний ряд: цветом показана продольная скорость. Красный — к ловушке, синий — к выходу.

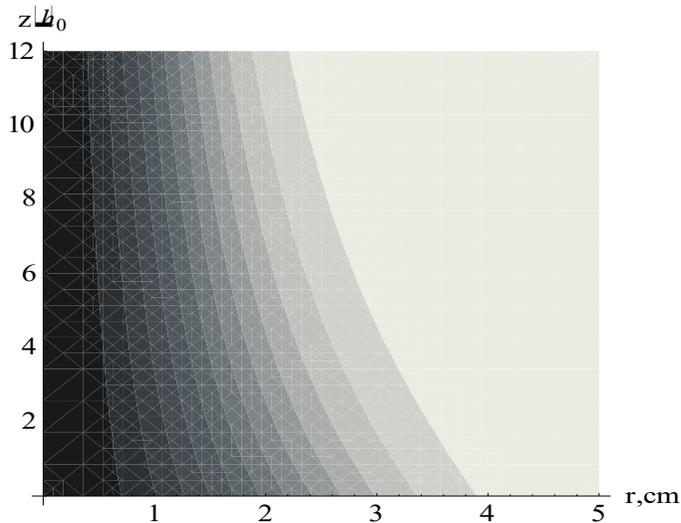
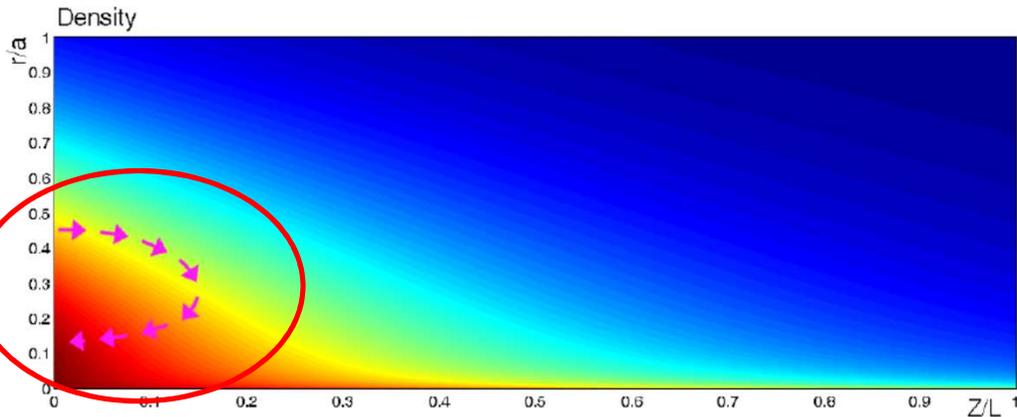
В приосевой области запертые частицы движутся с большей продольной скоростью.

Относительная скорость пролётных и запертых частиц в среднем не равна нулю. Наиболее вероятное рассеяние запертой частицы — с уменьшением продольной скорости.

Из запертых в запертые: траектория с большей вероятностью смещается к оси.

Из запертых в пролётные: частицы с большей продольной скоростью оказываются ближе к оси.

Течение плазмы в винтовом поле



- На плазму действует продольная сила, связанная с передачей импульса от поля к запертым частицам.

$$dF_z \sim j_r \alpha |B|$$

- Плотность спадает вдоль каждой силовой линии:

$$n(r, z) \sim \exp(-z/z_0)$$

$$z_0 = z_0(v_\theta, T_e, B_{max}/B_{min}, \alpha, D_\perp)$$

- Часть частиц, покинувших область удержания, возвращается обратно. Обратный поток сжат к приосевой области.
- Потери из области удержания снижаются
- Средний радиус плазменного шнура уменьшается. Причины: дрейф к оси, большая глубина гофрировки поля на периферии.
- Внизу показан расчётный профиль плотности без учёта диффузии при скорости $E \times B$ дрейфа, соответствующей $U = 3 \cdot T_e$

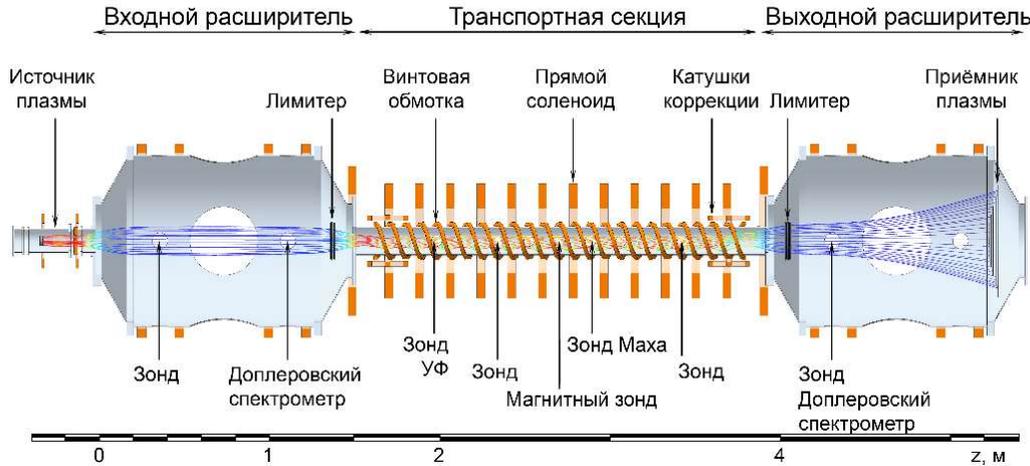
A. D. Beklemishev. 2016. *AIP Conf. Proc.* **1771**, 040006.

A. V. Sudnikov et al. 2017, *Fusion Engineering and Design.* **122**.

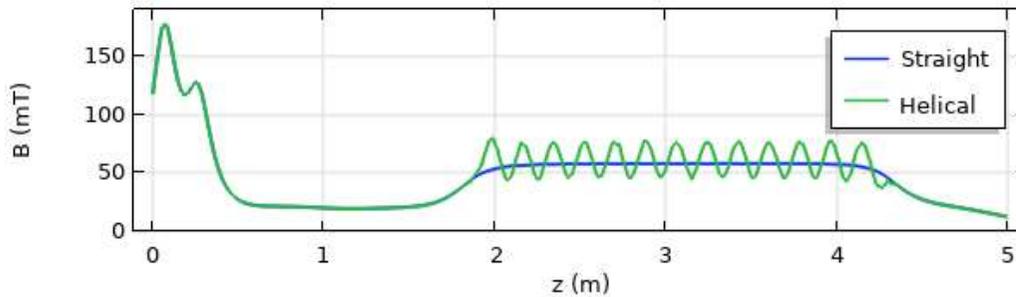
Содержание

- **Введение**
 - Открытые магнитные ловушки для удержания плазмы
 - Проект ГДМЛ: газодинамическая многопробочная ловушка
 - Многопробочное и винтовое удержание
- **Экспериментальная демонстрация винтового удержания**
 - Установка СМОЛА. Эксперименты с винтовыми пробками
 - Комбинация пробок различных типов
 - Удержание при слабой кулоновской столкновительности
- **Возможности для дальнейших исследований**
 - Винтовые секции ГДМЛ
 - Открытые вопросы и модернизация установки СМОЛА

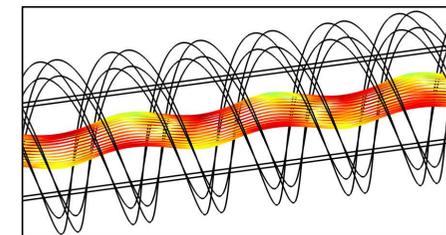
Установка СМОЛА



- Установка СМОЛА — стенд с минимальными параметрами, необходимыми для проверки идеи винтового удержания.
- Основной задачей была демонстрация снижения потока через транспортную секцию при переходе от прямого поля к винтовому.
- Эффективное пробочное отношение R_{eff} : пробочное отношение короткой пробки, поток через которую равнялся бы потоку через многопробочную секцию :

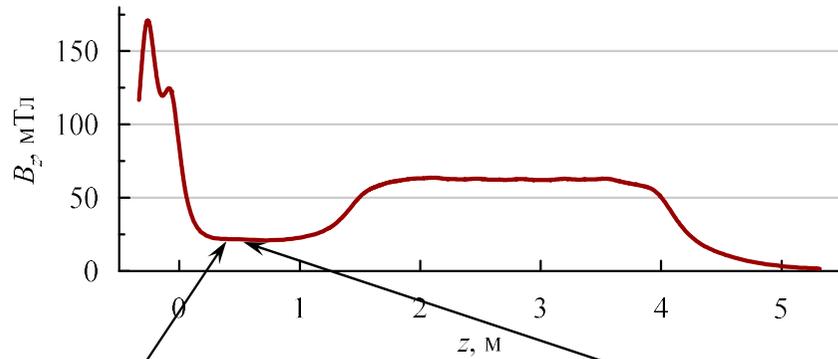


h [см]	N [1]	r [см]	B_z [мТл]	R_{mean} [1]	n_i [10^{18} м^{-3}]	T_i [эВ]	T_e [эВ]	ω [с^{-1}]	λ [м]
18	12	5	50–100	1 – 1.7	0.25–5.6	4–7	20–30	до 1.2×10^6	0.2–2.5



A.V. Sudnikov et al., Fusion Engineering and Design. Vol. 122., 2017.

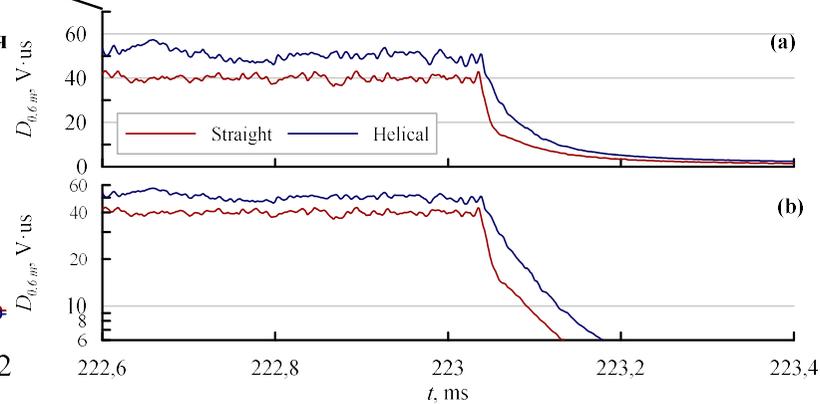
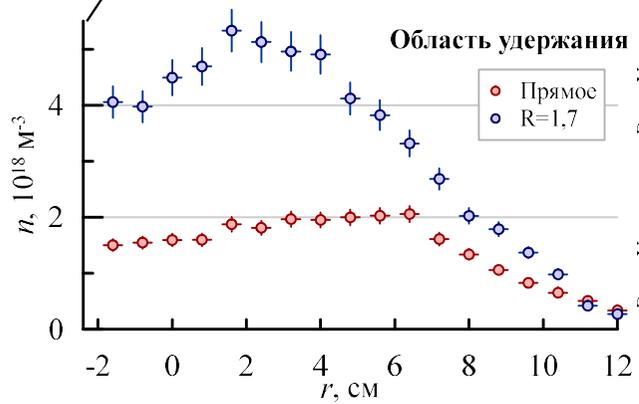
Эффект винтового удержания



- В транспортной секции прямое либо винтовое магнитное поле
- Эффективное пробочное отношение R_{eff} :
- Прямое поле:
- Винтовое поле ($R_{mean} = 1.7$):

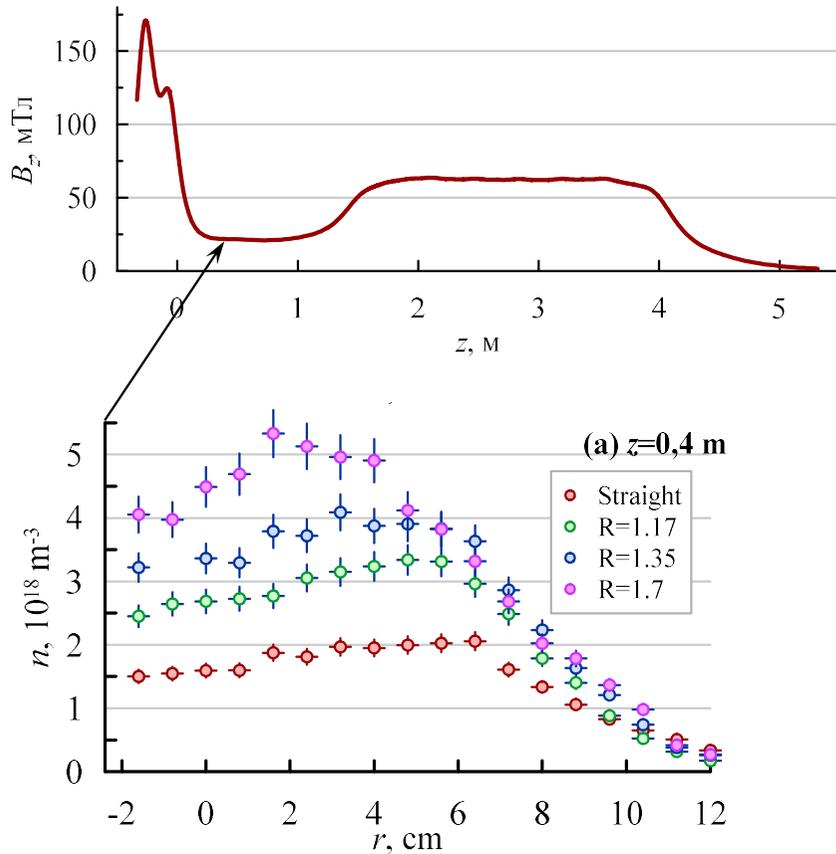
$$R_{eff} \equiv 3$$

$$R_{eff} = 17.2$$



A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 86, No. 5, 2020.
 A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 88, No. 1, 2022.
 A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 90, No. 4, 2024.

Параметры, определяющие эффективность удержания



Эффективное пробочное отношение растёт:

- с ростом средней по сечению глубины гофрировки;
- с ростом скорости вращения.

Эффективность падает при недостаточном ведущем магнитном поле ($B_z < \sim 60$ мТл).

При $\omega \sim 1.1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$:

$R_{mean} = 1$ (прямое поле):

$$R_{eff} \equiv 3$$

$R_{mean} = 1.17$:

$$R_{eff} = 6.3$$

$R_{mean} = 1.35$:

$$R_{eff} = 8.8$$

$R_{mean} = 1.7$:

$$R_{eff} = 17.2$$

При $R_{mean} = 1.35$:

$\omega \sim 0.3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$:

$$R_{eff} = 4.0$$

$\omega \sim 0.6 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$:

$$R_{eff} = 6.6$$

$\omega \sim 1.0 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$:

$$R_{eff} = 8.0$$

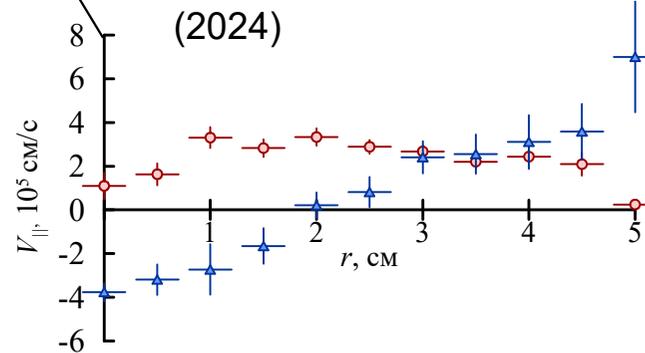
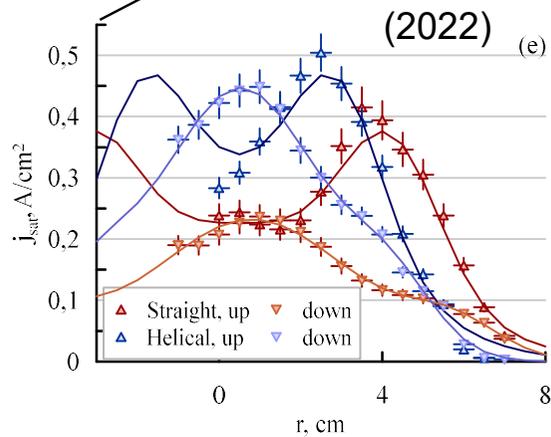
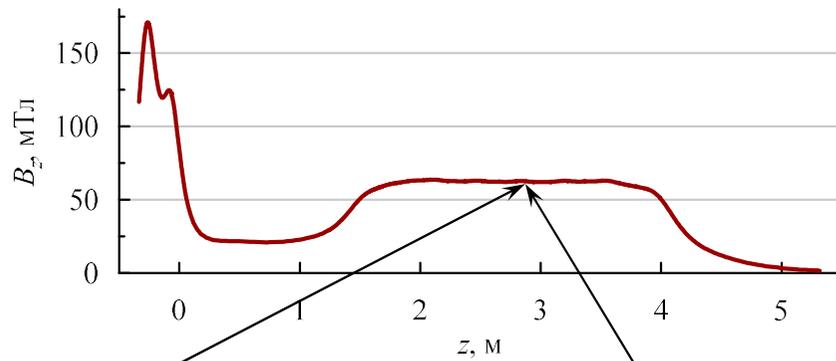
$\omega \sim 1.1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$:

$$R_{eff} = 8.8$$

A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 86, No. 5, 2020.

A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 88, No. 1, 2022.

Наблюдение обратного потока



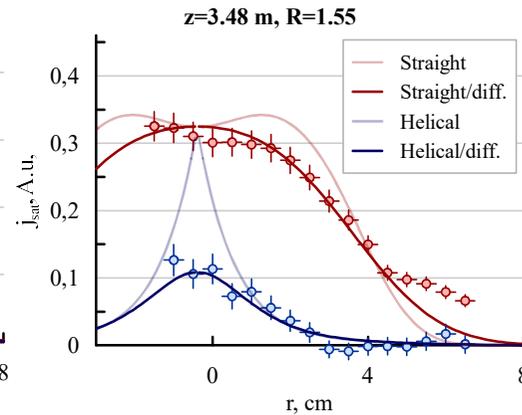
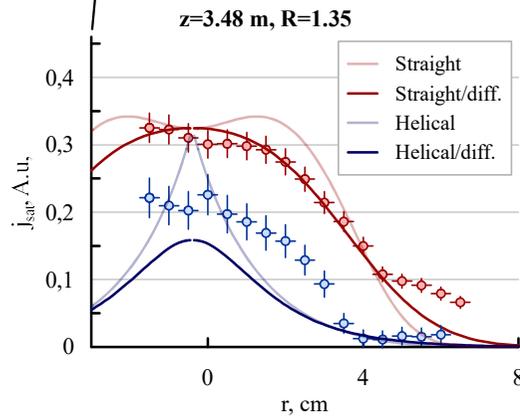
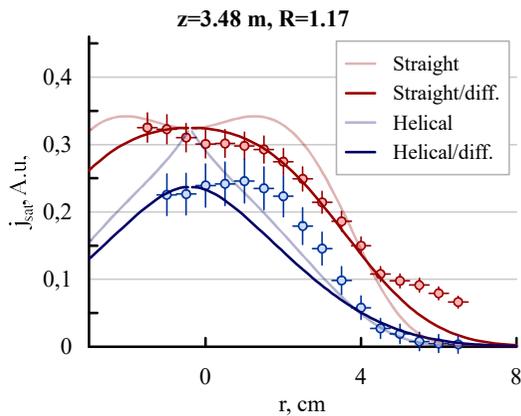
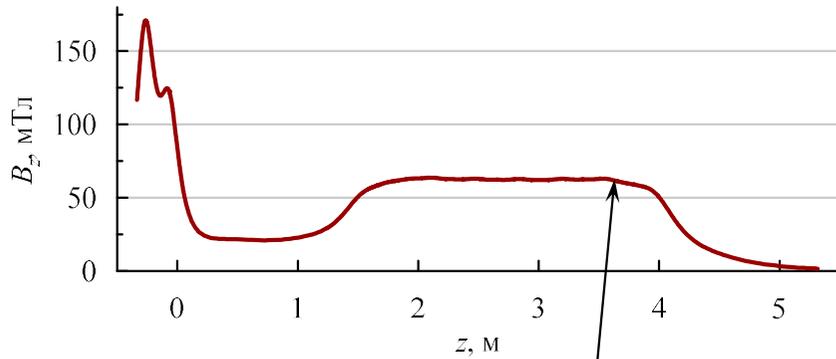
- При достаточной скорости вращения и достаточной глубине гофрировки наблюдается инверсия скорости в приосевой области.
- Обратный поток захваченных частиц наблюдается только при включении винтового поля.
- Обратный поток сжат к оси.

A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 88. No. 1, 2022.

А. А. Инжеваткина и др., *Физика плазмы*. Т.50, №1, 2024.

Пинчевание плазменного шнура

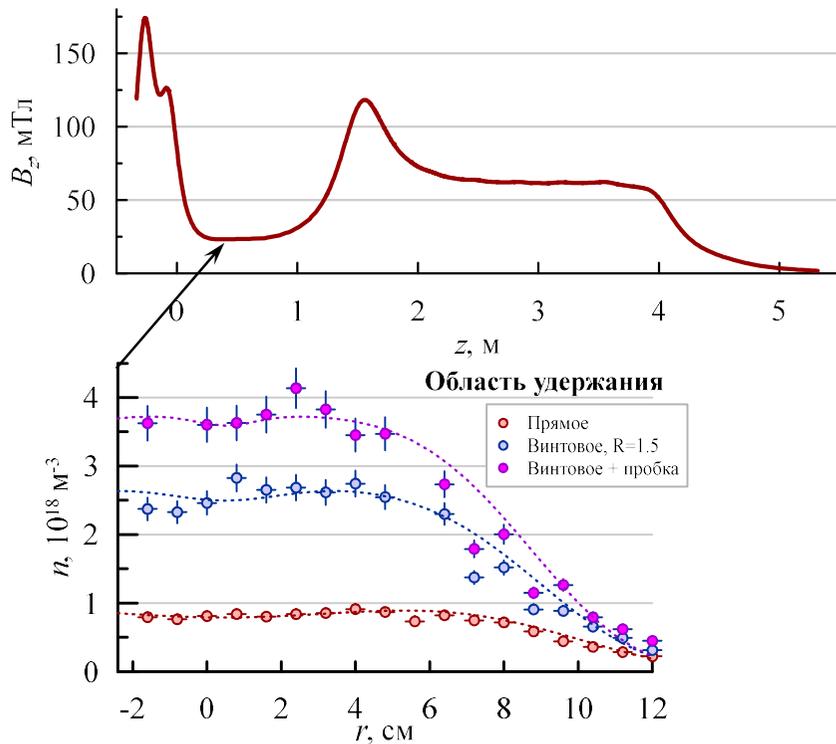
- Как плотность, так и ширина плазменного шнура уменьшается при использовании винтового поля. Чем сильнее гофрировка, тем более выражен эффект.
- Измеренные распределения плотности, в целом, отвечают теоретическим ожиданиям.



A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 86, No. 5, 2020.

A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 88, No. 1, 2022.

Совместное использование различных методов

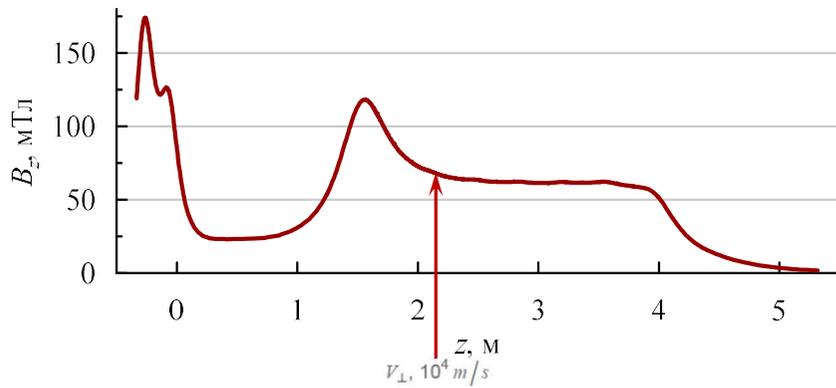


- Добавлена пробка между ловушкой и транспортной секцией
- В лучшем случае каждый из методов действует независимо, эффективность комбинации пробок равна произведению эффективностей составных частей
- В худшем случае эффективность равна эффективности лучшей из составных частей

$$\max[R_i] \leq R_{eff} \leq \prod R_i$$

- Прямое поле: $R_{eff} \equiv 3$
- Пробка + прямое поле: $R_{eff} = 6.1$
- Винтовое поле ($R_{mean} = 1.5$): $R_{eff} = 11.5$
- Пробка + винтовое поле ($R_{mean} = 1.5$): $R_{eff} = 32.6$
- Любая комбинация пробок показывает бóльшую эффективность, чем каждый из элементов по отдельности

Совместное использование различных методов

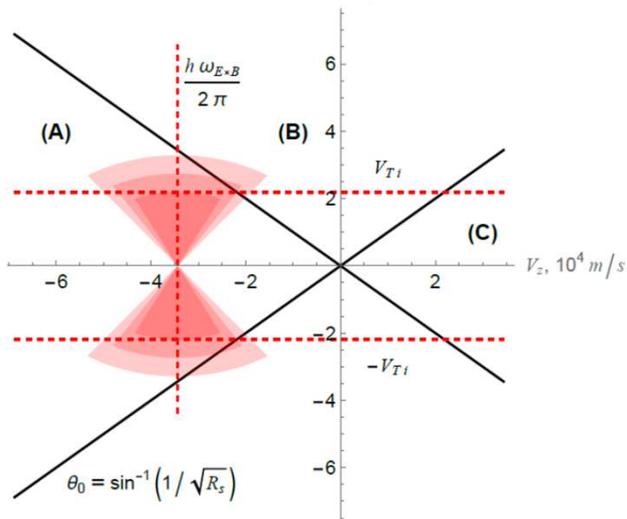


Интуитивное объяснение:

Частицы, захваченные многопробочным полем, имеют продольную скорость $v_z \sim h \cdot \omega_{E \times B}$ и поперечную скорость $v_{perp} \sim v_{Ti}$. Эта точка может лежать внутри конуса потерь короткой пробки.

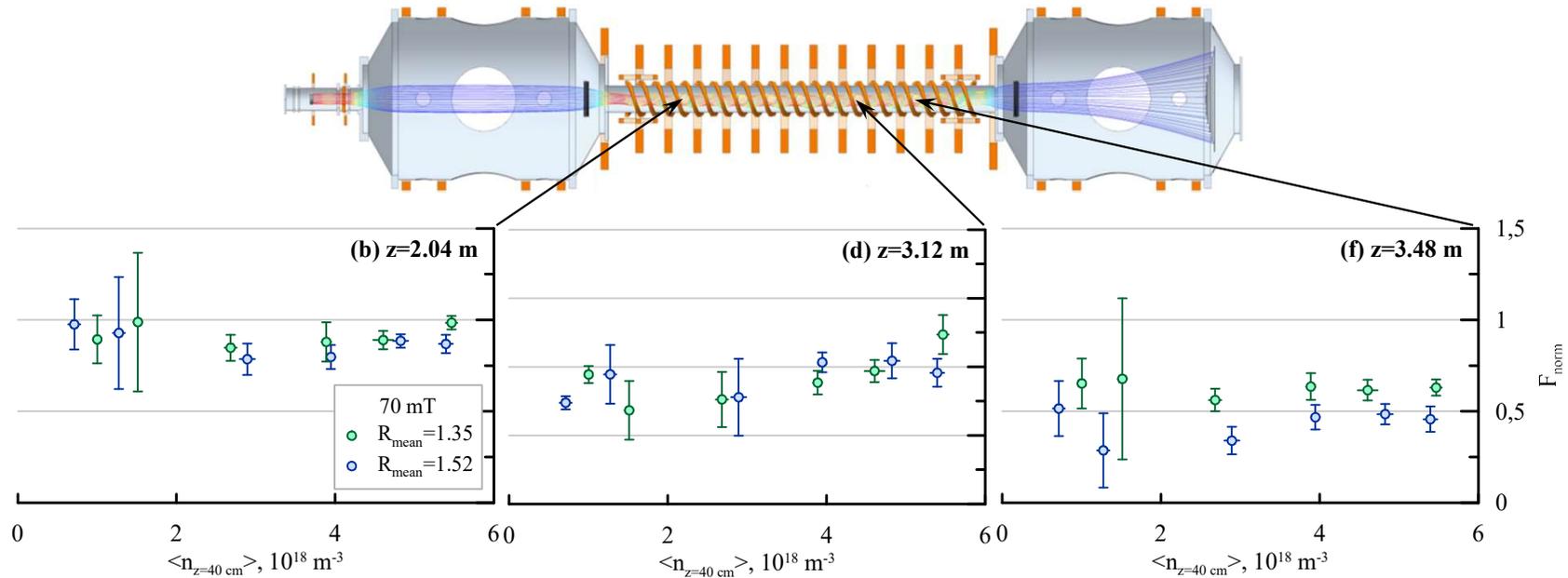
Проверяемое следствие:

Существует максимальное пробочное отношение (для $v_z \sim 2V_{Ti} \rightarrow R_s/R_2 \sim 5$), при котором комбинация пробок работает максимально эффективно.



A.V. Sudnikov et al., *Journal of Plasma Physics*. Vol. 90. No. 4, 2024.

Изменение кулоновской столкновительности



Нормированный поток и средняя скорость течения в транспортной секции не зависят от кулоновской столкновительности. Удержание не деградирует при низкой плотности.

Существуют механизмы аномального рассеяния (рассеяние частиц на колебаниях).

Скорость запертых частиц $V_z = h \cdot \omega_{E \times B}$ может превышать тепловую \rightarrow источник энергии для раскачки колебаний.

Колебания потенциала наблюдаются в эксперименте.

A.V. Sudnikov et al., Journal of Plasma Physics. Vol. 88. No. 6, 2022.

M.S. Tolkahev et al., Journal of Plasma Physics. Vol. 90. No. 1, 2024.

И.С. Черноштанов, МС-2-7

Содержание

- **Введение**
Открытые магнитные ловушки для удержания плазмы
Проект ГДМЛ: газодинамическая многопробочная ловушка
Многопробочное и винтовое удержание
- **Экспериментальная демонстрация винтового удержания**
Установка СМОЛА. Эксперименты с винтовыми пробками
Комбинация пробок различных типов
Удержание при слабой кулоновской столкновительности
- **Возможности для дальнейших исследований**
Винтовые секции ГДМЛ
Открытые вопросы и модернизация установки СМОЛА

Предсказания модели переноса для ГДМЛ

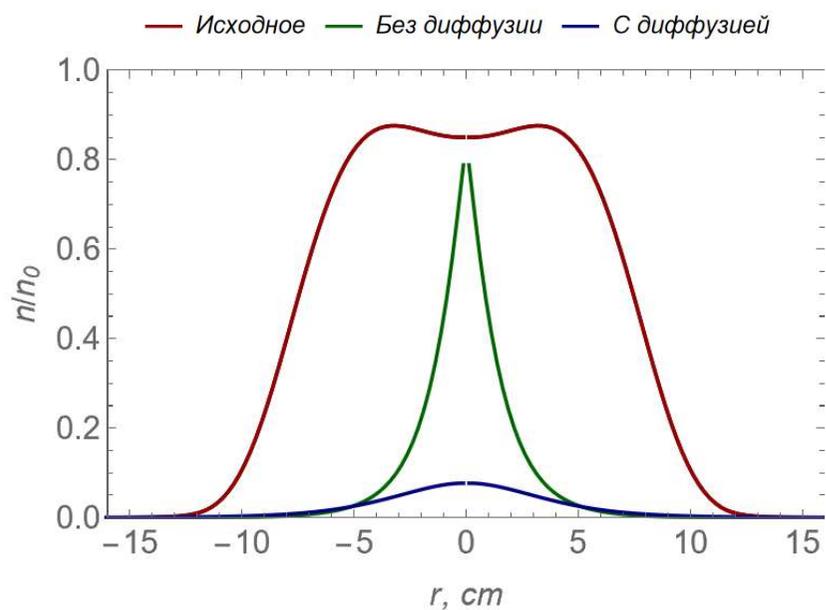
Модельный расчёт винтовой секции для ГДМЛ.

$$N = 16, h = 100 \text{ см}, B = 5 \text{ Тл}, T_e = 710 \text{ эВ}, T_i = 1390 \text{ эВ}, n = 3.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}, R_{mean} = 1.5, \omega = 1.2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Расчётная эффективность без учёта поперечной диффузии $R_{eff} \approx 14$.

Эффективность может быть выше, если R_{mean} растёт с удалением от центральной ловушки или если радиальная диффузия высока.

Кулоновская столкновительность для таких параметров $\nu^* = 4 \cdot 10^{-3} \ll 1$



Плотность, температура взяты из [Д. И. Сквородин [и др.].
Газодинамическая многопробочная ловушка ГДМЛ // Физика плазмы, 2023,
т.49, №9, стр. 850, табл. 7, последняя колонка]

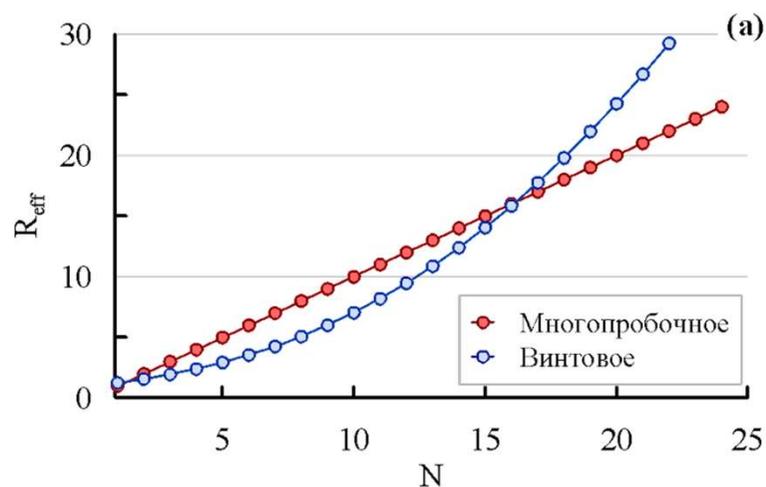
Предсказания модели переноса для ГДМЛ

Сравнение многопробочного и винтового удержания: разумно сопоставлять системы с равным локальным пробочным отношением на границе плазменного шнура.

На рисунке $R_{mm} = 2$ в многопробочной системе и $R_{mean} = 1.5$ в винтовой.

Короткие многопробочные секции эффективнее (больше пробочное отношение). Длинные винтовые секции эффективнее (экспоненциальная зависимость от длины). Равная эффективность систем соответствует длине $L = 10-20 h$

(NB: эта длина зависит от скорости вращения, радиального профиля плотности и радиальной диффузии)



Винтовое удержание: дальнейшие задачи

1. Пропасть между настольной демонстрацией и использованием в большой ловушке должна быть преодолена в 2–3 прыжка

2. ГДМЛ должен работать при безразмерной столкновительности (*отношении длины свободного пробега относительно парных столкновений к периоду магнитного поля*) $\nu^* = \lambda/h \sim 1 / 400$

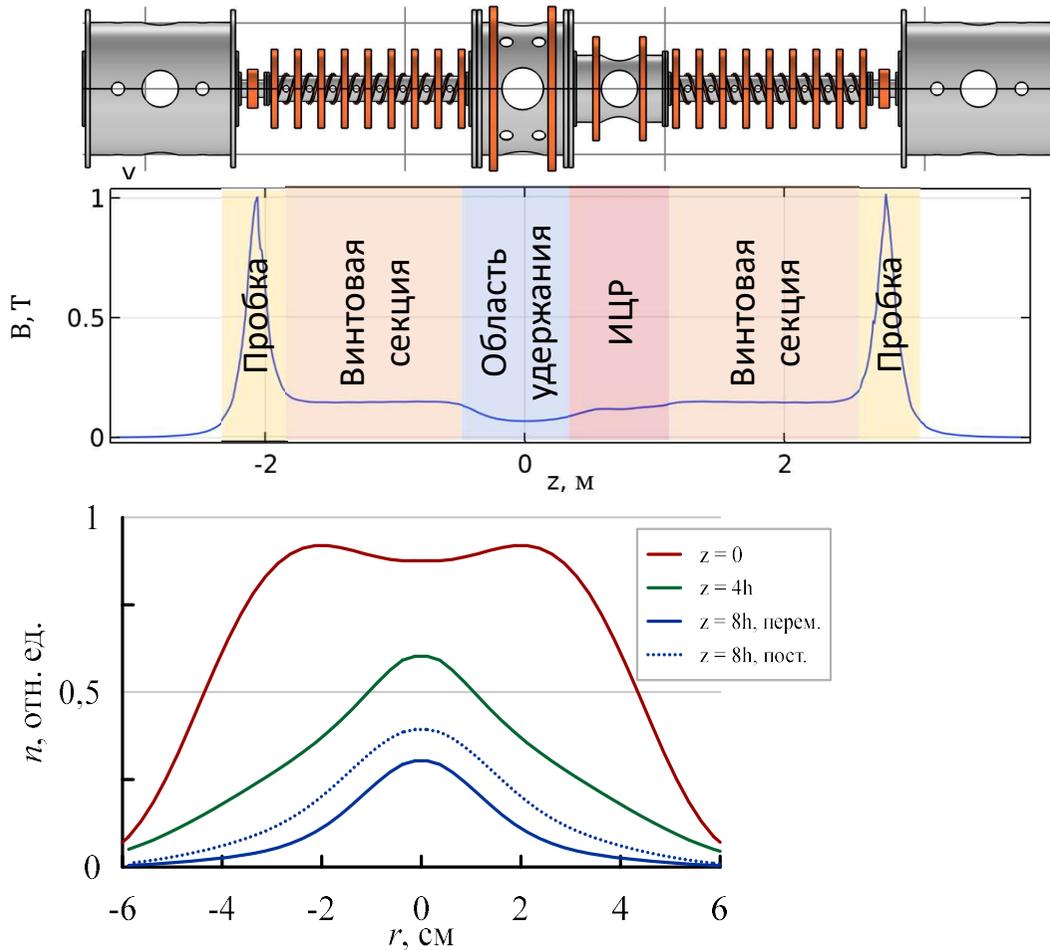
В эксперименте малого масштаба достижимо при $n \sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $T_i \sim 25\text{--}40 \text{ эВ}$ с использованием ИЦР-нагрева

3. ГДМЛ создаётся как открытая ловушка с подавлением потерь в обе стороны

В модельном эксперименте также необходимо отойти от протока плазмы и запирают потери с двух сторон

4. Необходимо сохранять стационарность.

Установка СМОЛА*



- ИЦР нагрев, мощность до 60 кВт
- Две винтовые пробки длиной 8 периодов с повышенной и переменной по длине глубиной гофрировки ($N = 8$, $R_{mean} \sim 1.85$, $R_{eff} \sim 10$)

- Две пробки до 1 Тл

Задачи:

- Многопробочное удержание при слабой кулоновской столкновительности
- Вращение плазмы в ловушке
- Подавление потерь различными типами пробок
- Ввод вещества в ловушку через винтовые пробки

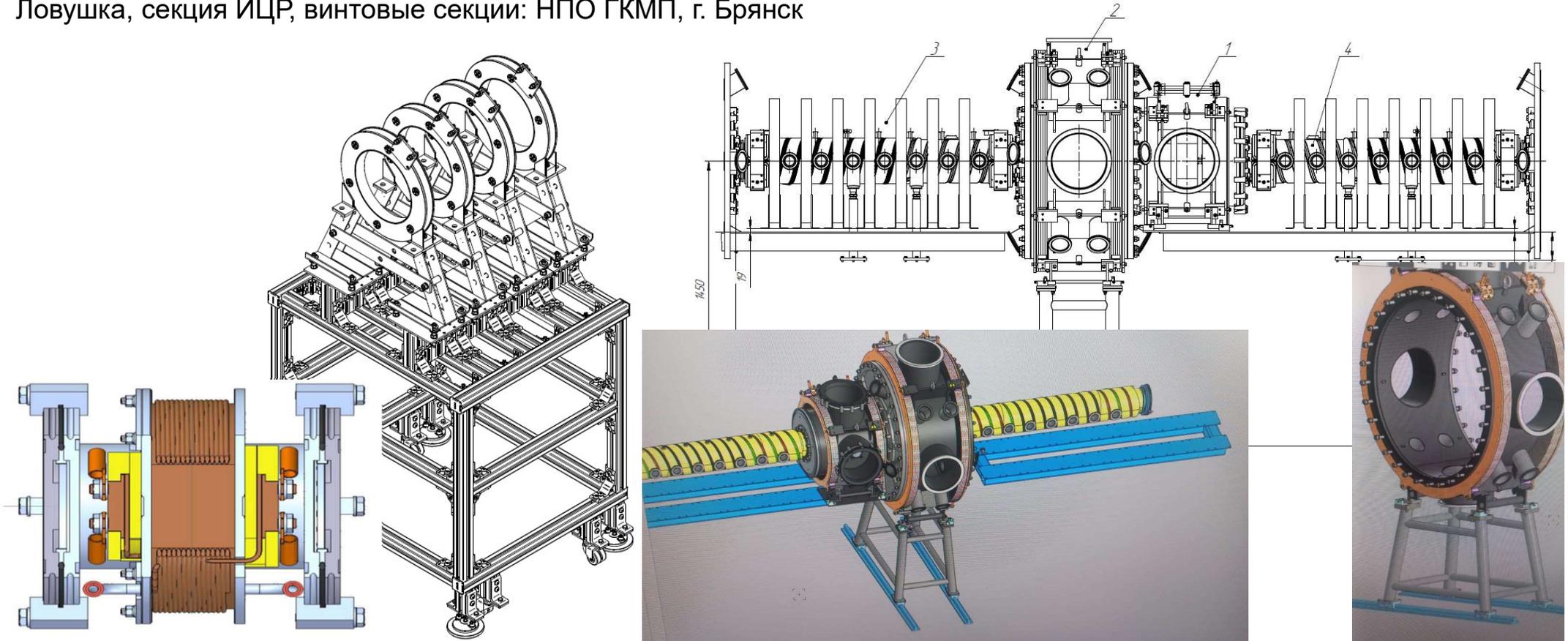
* Установка СМОЛА будет разобрана и собрана заново. Конфигурация установки существенно изменится.

Магнитовакуумная система

Узлы для модернизации магнитовакуумной системы изготавливаются.

Сильные пробки, дополнительные катушки соленоида, подставки: ЭП ИЯФ

Ловушка, секция ИЦР, винтовые секции: НПО ГКМП, г. Брянск



20.03.2025

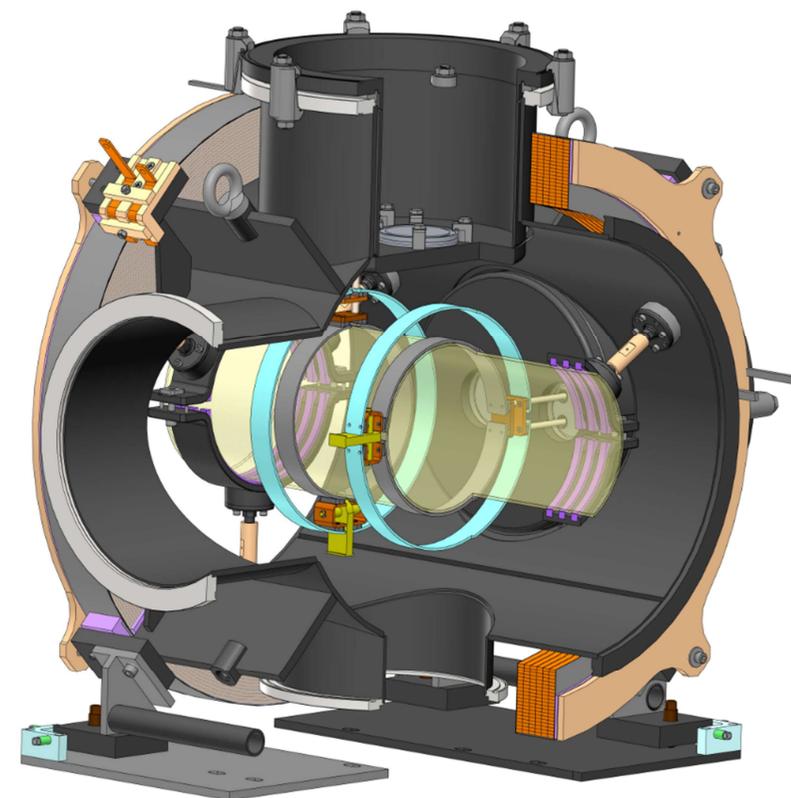
А. В. Судников. Винтовое удержание в открытой ловушке

32

ИЦР нагрев

Генератор ВЧ (0.6–2.3 МГц, до 60 кВт) поставлен НПП Триада-ТВ, г. Новосибирск

Антенный узел в производстве НПО ГКМП, г. Брянск



20.03.2025

А. В. Судников. Винтовое удержание в открытой ловушке

33

Заключение

Многопробочные секции с винтовой симметрией улучшают удержание вращающейся плазмы в открытой ловушке

Найдены режимы удержания с высокой эффективностью

Эффект зависит от винтовой симметрии эксперимента

Наблюдаемые эффекты отвечают теоретическим ожиданиям

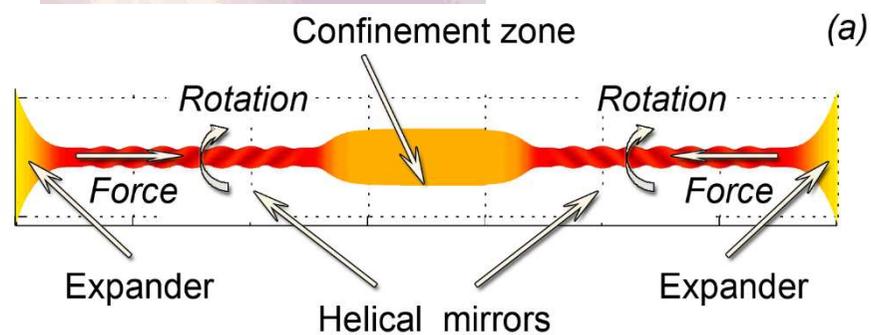
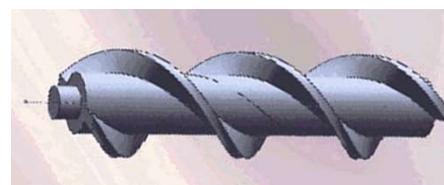
Для многопробочного удержания в горячей плазме необходимо аномальное рассеяние ионов

Признаки аномального рассеяния наблюдаются в эксперименте. В винтовой ловушке возможен механизм аномального рассеяния, не требующий внешних воздействий

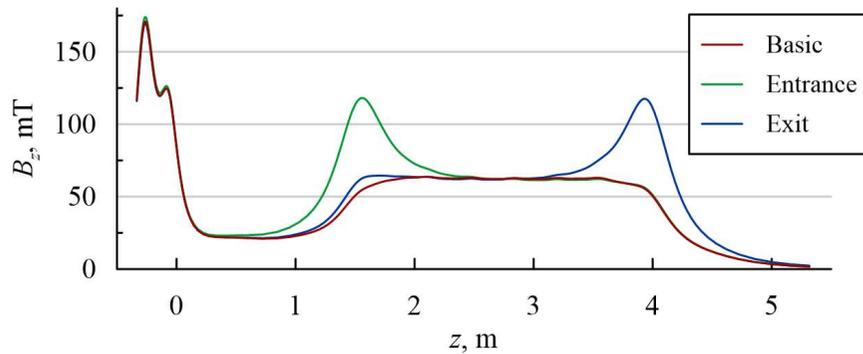
Модернизированная установка СМОЛА* будет представлять собой ловушку с симметричными пробками и доп. нагревом ионов. Цель — исследование удержания при безразмерной столкновительности ν^* , как в ГДМЛ

Модернизация — 2025 год

Спасибо за внимание!

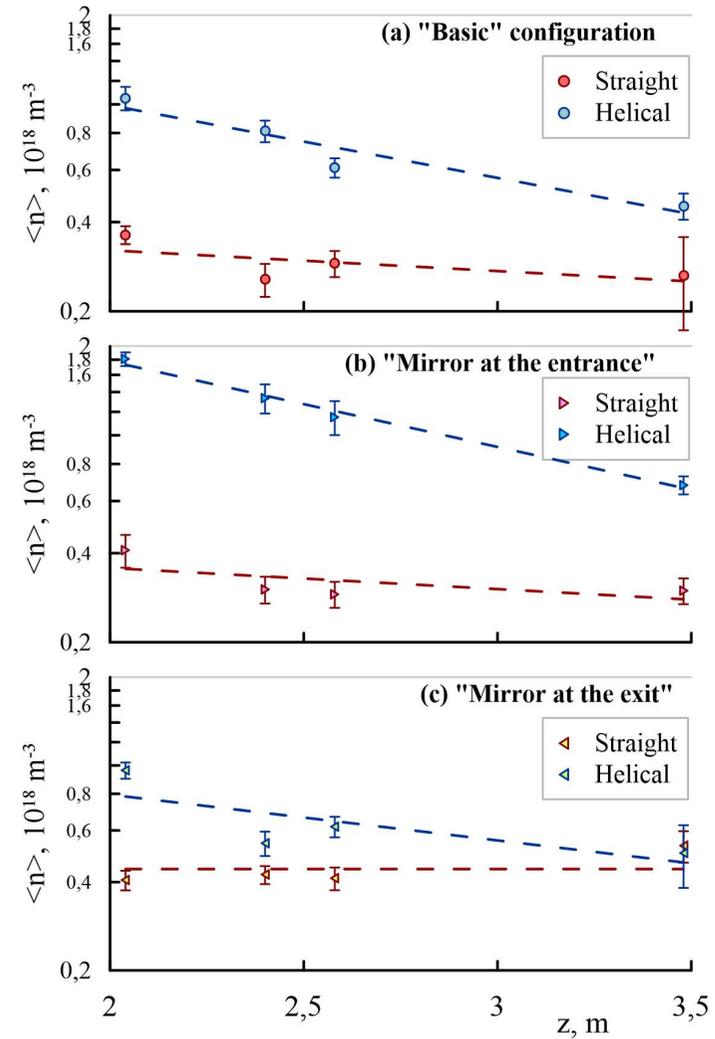


Продольное распределение плотности



- Продольное распределение плотности близко к экспоненциальному:

$$n(r, z) = n(r, 0) \exp(-z/z_0(r))$$



К вопросу аномальной столкновительности

Основное отличие любой «бегущей» гофрировки — наличие доли запертых частиц, движущихся навстречу потоку плазмы со скоростью $V_z = h \cdot \omega_{E \times B}$.

Скорость в 2–3 раза превышает тепловую и звуковую скорости. Есть условия для развития микронеустойчивостей.

Поток энергии идёт по следующему пути: внешний источник → запертые ионы → переменное электрическое поле → рассеиваемые ионы.

Необходимая частота аномального рассеяния сравнительно невелика:

$$\text{для } T = 1 \text{ кэВ, } h = 1 \text{ м: } v_{eff} = V_{Ti}/h \approx 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} < 10^{-2} \omega_{Bi}$$

Мощность, передаваемая рассеиваемым ионам:

$$P_i \sim (1 - \kappa) v_{eff} (V_{Ti} \delta V) \sim (1 - \kappa) v_{eff} V_{Ti}^2$$

Характерное время, за которое энергия должна передаваться к волне:

$$\tau \omega_{Bi} \sim \omega_{Bi} \frac{\kappa V_z^2}{P_i} \sim \frac{\omega_{Bi}}{v_{eff}} \frac{\kappa}{1 - \kappa} \frac{V_z^2}{V_{Ti}^2} \ll 1$$

Два узких места: реальные значения инкремента для волн с нужной пространственной структурой и возможность поддержания скорости магнитных возмущений, превышающей тепловую скорость ионов.