

Газодинамическая ловушка

В.В.Приходько и команда ГДЛ

- Физика расширителя
- Инжекция электронного пучка
- Установка КОТ

Введение

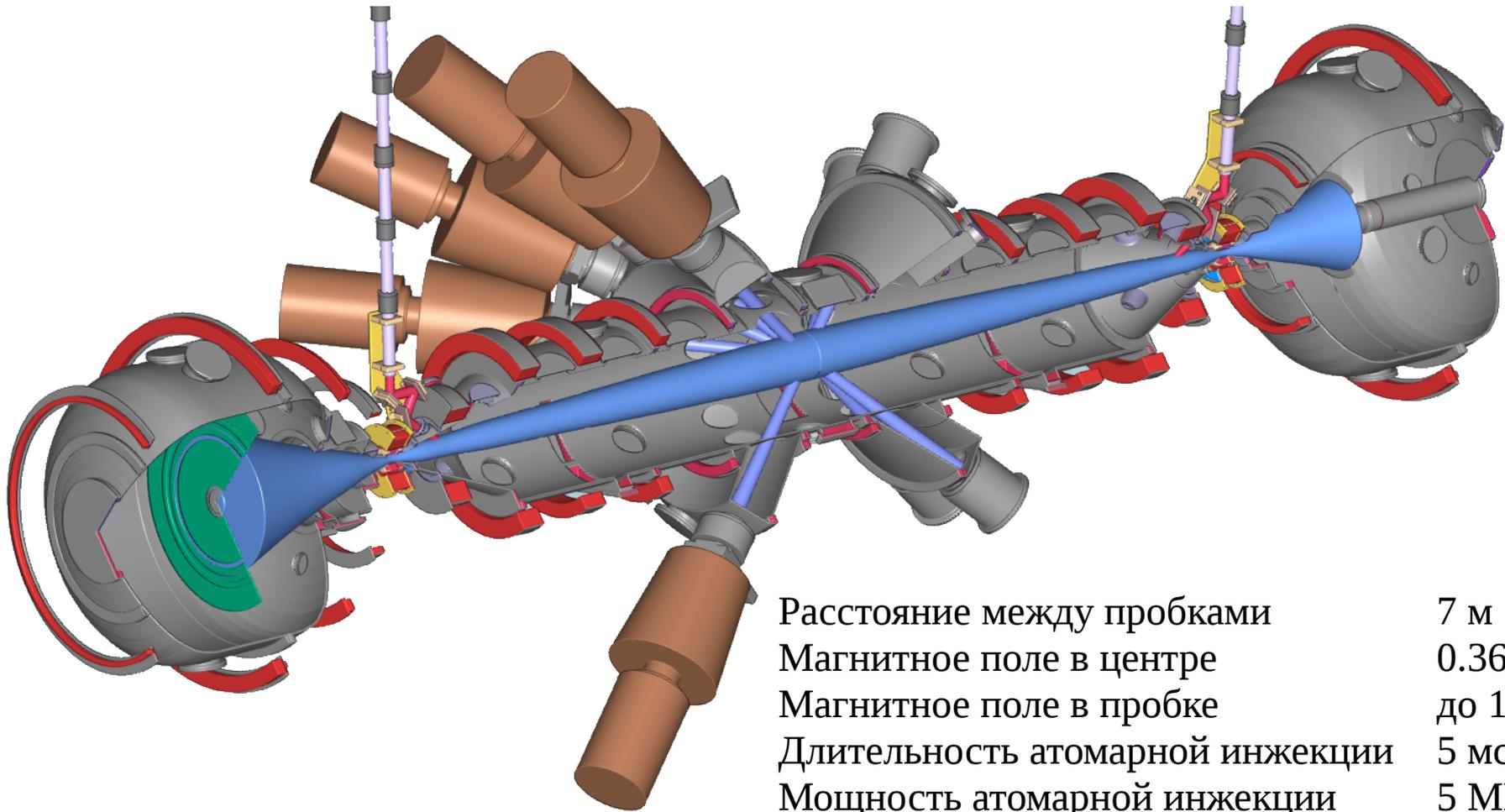
Исследования по теме ГДЛ направлены на обоснование проекта ГДМЛ и дальнейших термоядерных приложений магнитных ловушек открытого типа:

- 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 (термоизоляция плазмы, конструкция торцевых секций ГДМЛ и последующих установках реакторного класса);
- инжекция электронного пучка через магнитную пробку (метод создания предплазмы);
- изучение режимов высоким относительным давлением (обоснование диамагнитного удержания).

Установка ГДЛ



Расстояние между пробками	7 м
Магнитное поле в центре	0.36 Т
Магнитное поле в пробке	до 14 Т
Длительность атомарной инжекции	5 мс
Мощность атомарной инжекции	5 МВт
Мощность ЭЦР нагрева	700 кВт
Плотность теплой плазмы	до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Энергия быстрых ионов	9 кэВ
Относительное давление плазмы	до 60%
Температура электронов	250-900 эВ

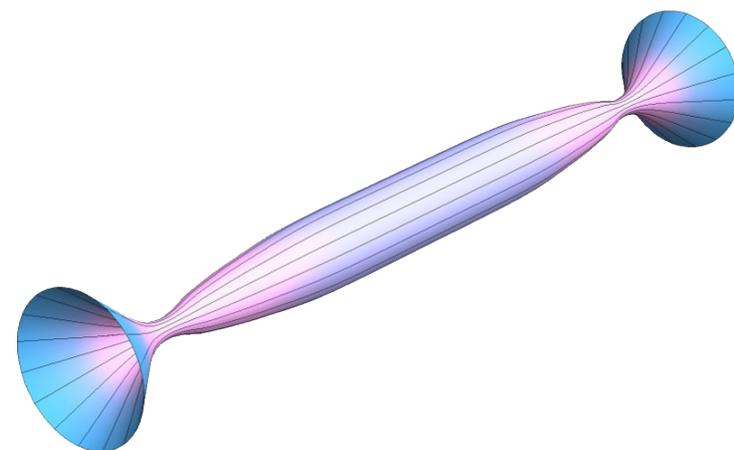
Расширитель

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

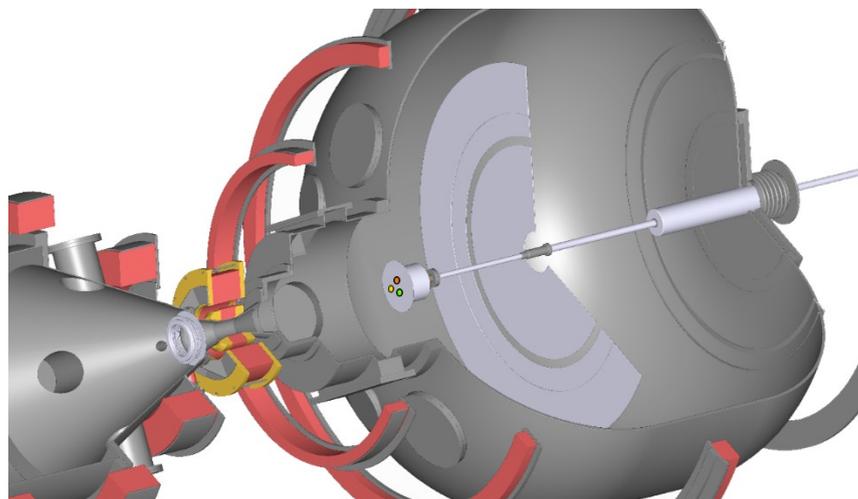
Для столкновительной плазмы $P_{\parallel} \sim T_e^{7/2}$ (при $T_e = 10$ кэВ, $L = 10$ м, $S = 1000$ см² получается $P_{\parallel} = 1$ ПВт).

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 этом случае $P_{\parallel} \sim T_e^{3/2}$.

Однако, при этом в расширителе могут рождаться холодные электроны (за счёт вторичной эмиссии с поверхности поглотителя и ионизации нейтрального газа в расширителе), которые могут проникать из расширителя в ловушку (замена горячих на холодные).

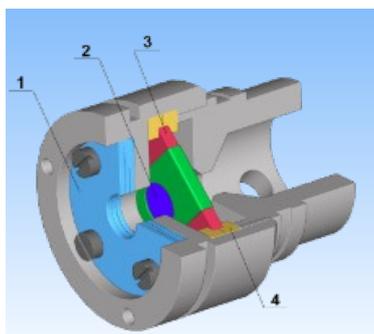


Изучение продольных потерь

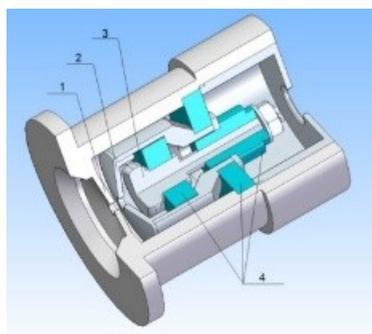


Интересующая нас величина – это средняя энергия, выносимая из ловушки одной электрон-ионной парой, нормированная на электронную температуру:

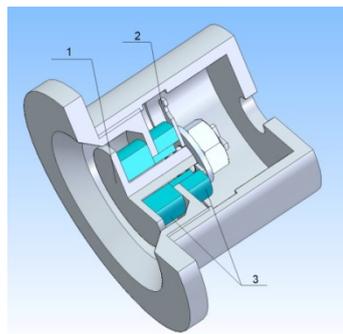
$$A = \frac{P_{\parallel}}{J_i \cdot T_e}$$



Пирозлектрический болометр (на основе LiNbO_3)



Трёхэлектродный ионный зонд ($U_{\text{смещ}} = -1600 \text{ В}$)

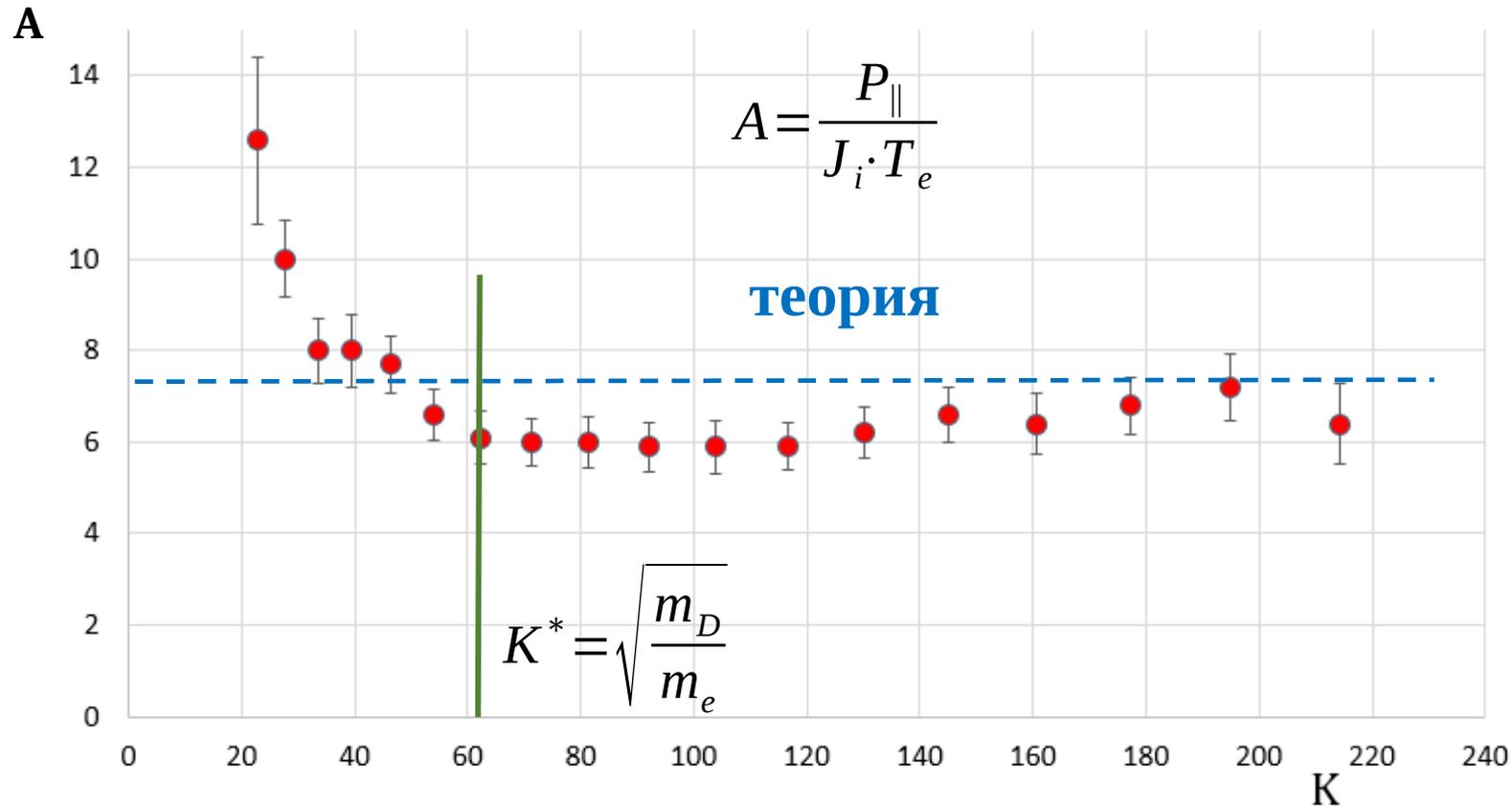


Плоский зонд в режиме сбора ионного тока ($U_{\text{смещ}} = -150 \text{ В}$)

Поток энергии измерялся пирозлектрическим болометром, поток ионов – трёхэлектродным зондом.

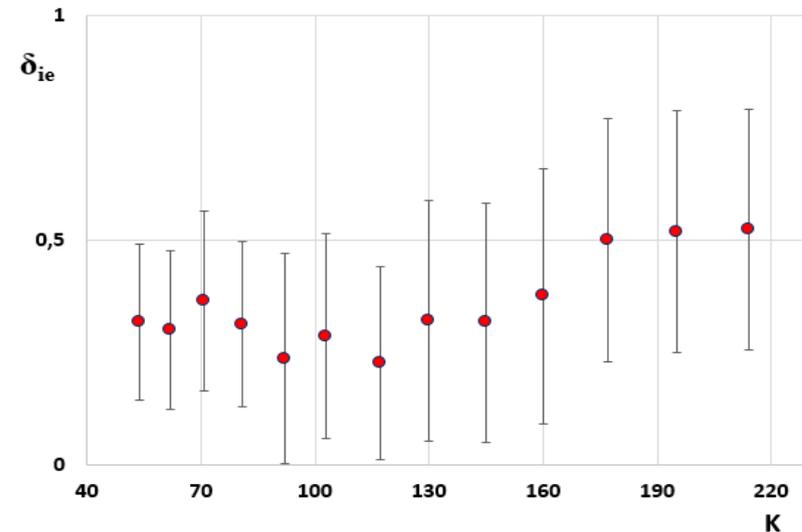
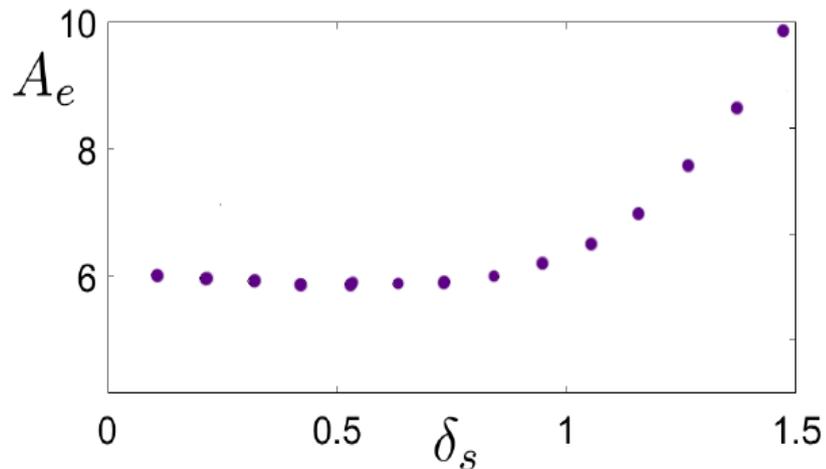
Плоский зонд использовался для экспериментальной оценки коэффициента вторичной эмиссии

Энергия, выносимая i-е парой



Потери энергии на ион-электронную пару именно такого масштаба закладываются в проект нейтронного источника на основе открытой ловушки.

Вторичная эмиссия



Разработанный кинетический код показал, что при больших степенях расширения магнитного поля за пробкой скачок потенциала в дебаевском слое у стенки уменьшается, из-за чего увеличиваетсяpitch-угол холодных вторичных электронов, и они отражаются назад к стенке, не оказывая влияния на удержание плазмы в ловушке;

Энергия, выносимая одной электрон-ионной парой $A_i \cdot T_i + A_e \cdot T_e$; величина A_e почти постоянна в широком диапазоне значений коэффициента вторичной эмиссии;

Величину A_i можно оценить как $3/2$, значит, суммарно электро-ионная пара (при условии $T_e = T_i$) оказывается порядка 7.5, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

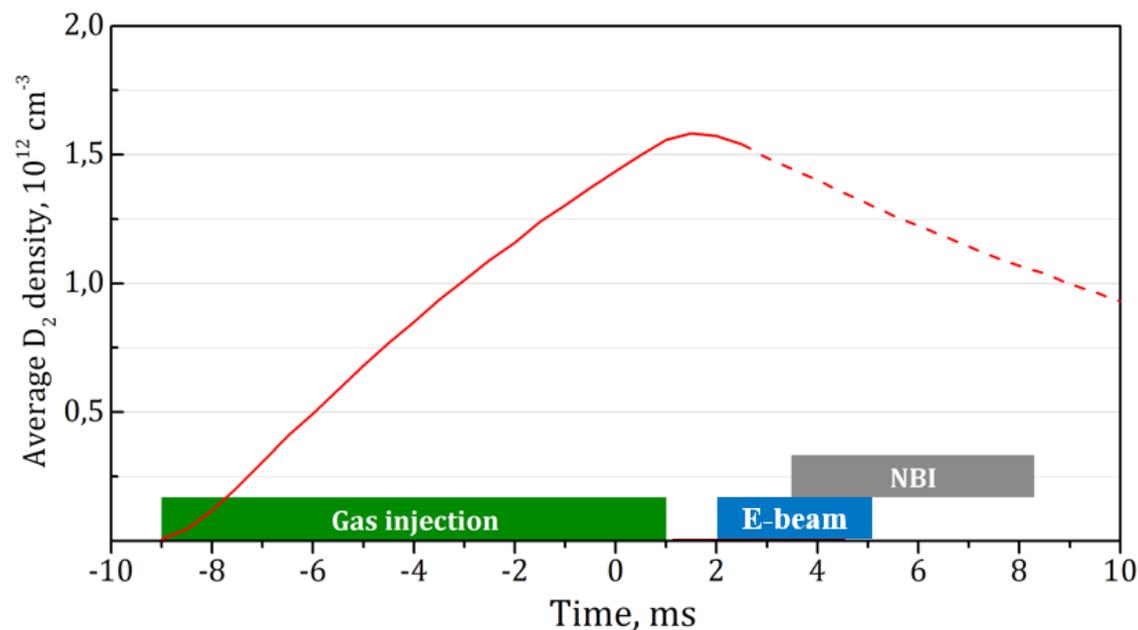
Измеренный коэффициент ион-электронной эмиссии составляет $\delta_{ie} \approx 0.5$. Коэффициент электрон-электронной для $T_e = 200$ эВ имеет тот же порядок величины $\delta_{ee} \approx 0.5$. Суммарный коэффициент вторичной эмиссии стремится к единице. Однако в экспериментах не наблюдается влияния холодных электронов на удержание плазмы в ловушке.

Инжекция электронного пучка

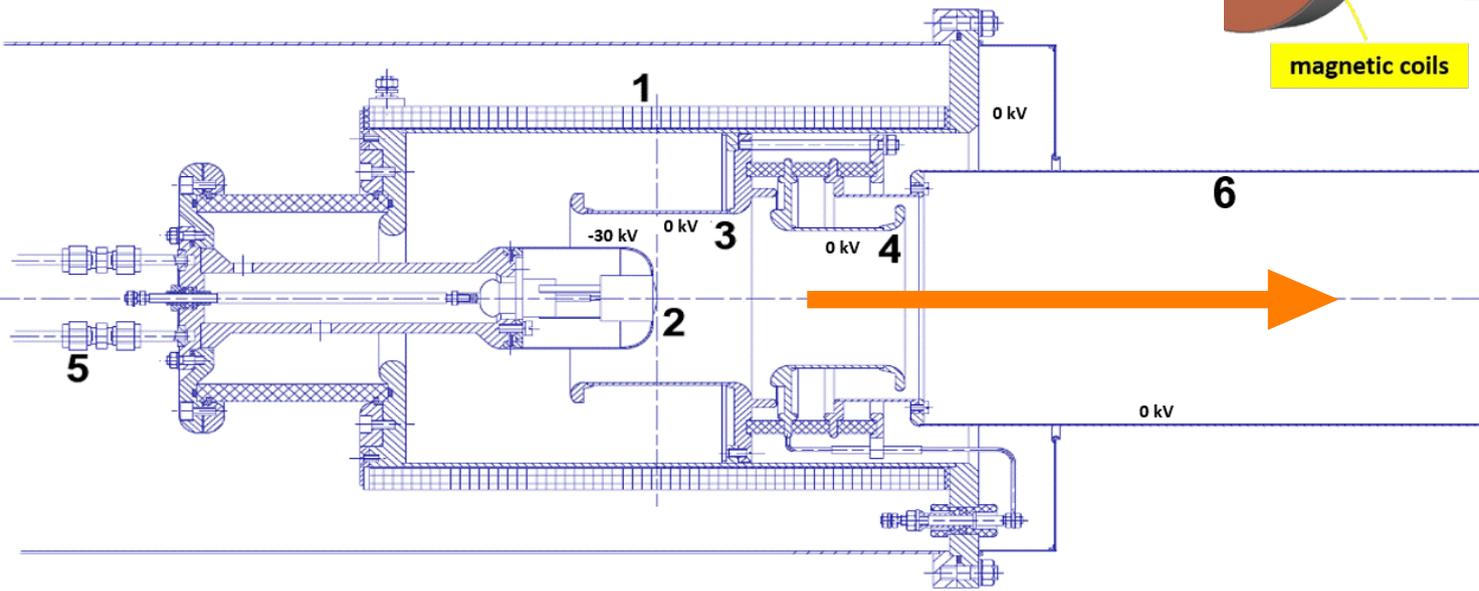
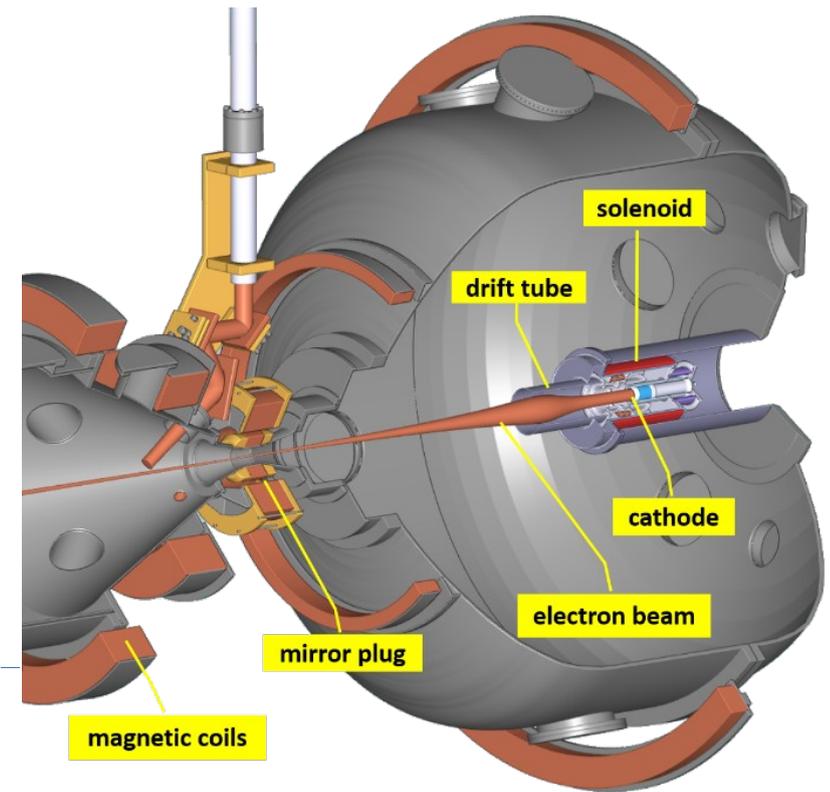
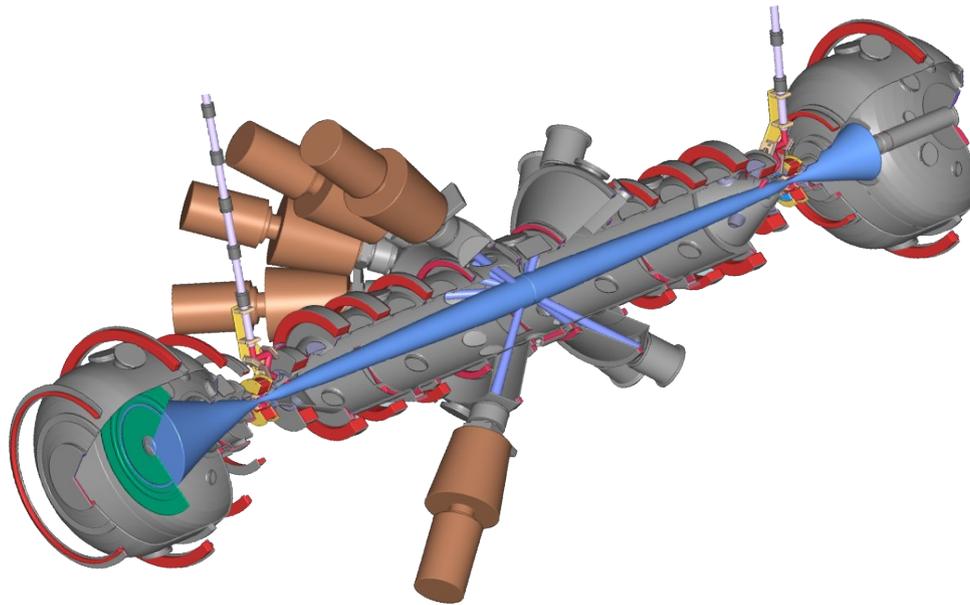
В прежних экспериментах исследовалась инжекция электронного пучка вдоль магнитного поля через пробку внутрь ловушки, заполненной газом или плазмой. Было показано, что формируется популяция захваченных электронов с энергиями существенно выше, чем в инжектируемом пучке. За времена порядка 0.1 мс диаметр области, занимаемой, захваченными электронами, становится много больше размеров пучка.

- ALEXEEF, I., et al., Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 273.
- A.G. Plakhov, et al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Vol. 11 P. 709. 1969

Ориентируясь на эти работы, инжекцию электронного пучка в ловушку, предварительно заполненную газом, можно рассматривать как метод создания начальной плазмы.

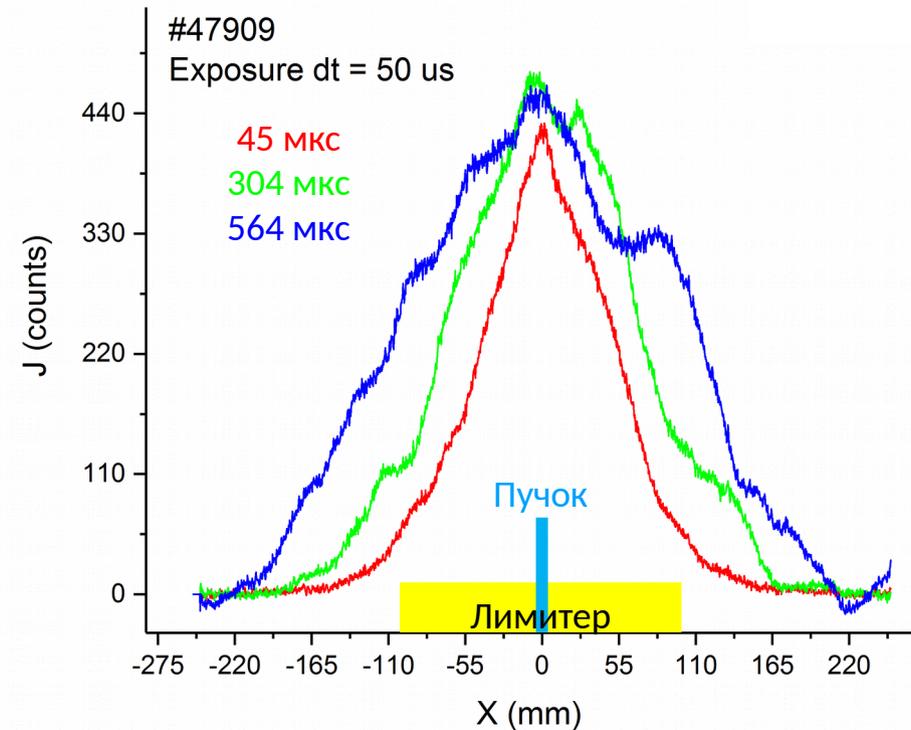
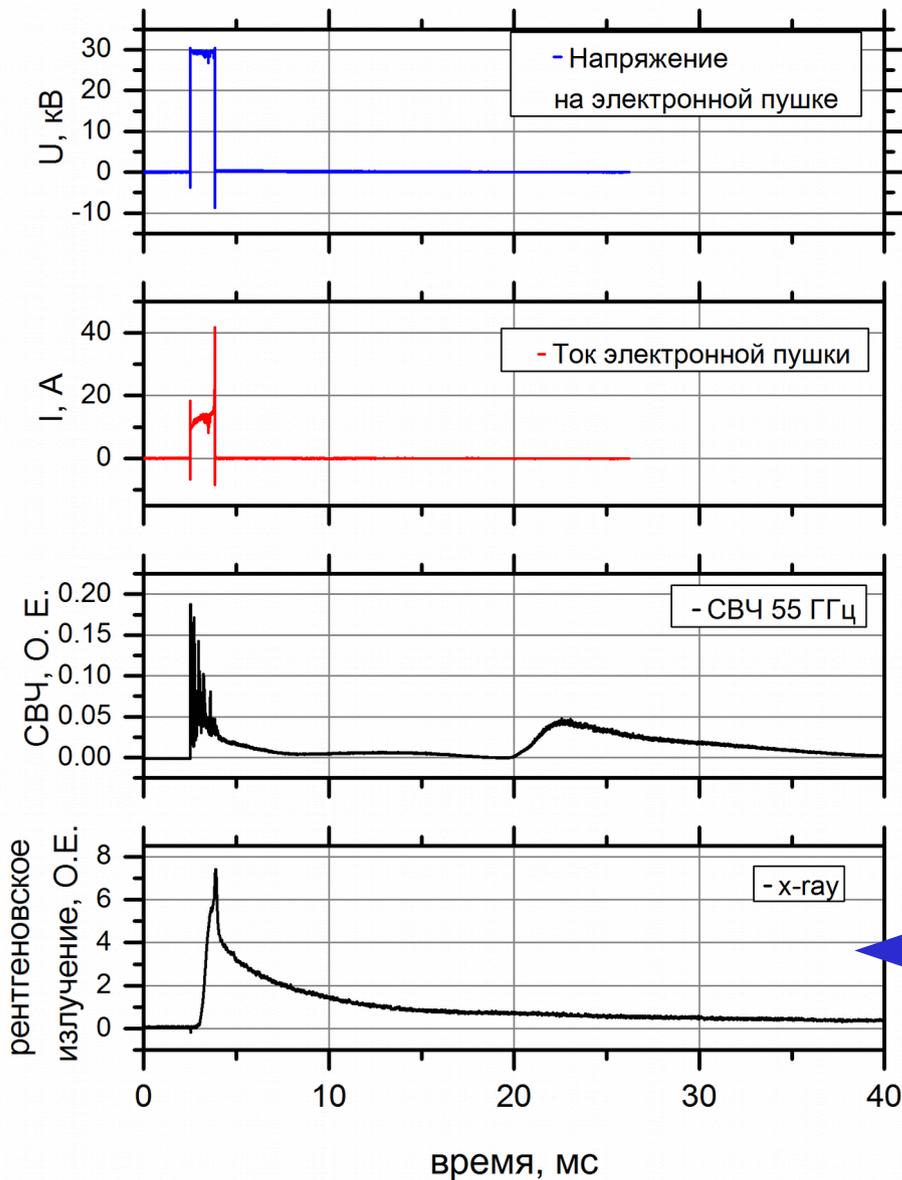


Электронная пушка



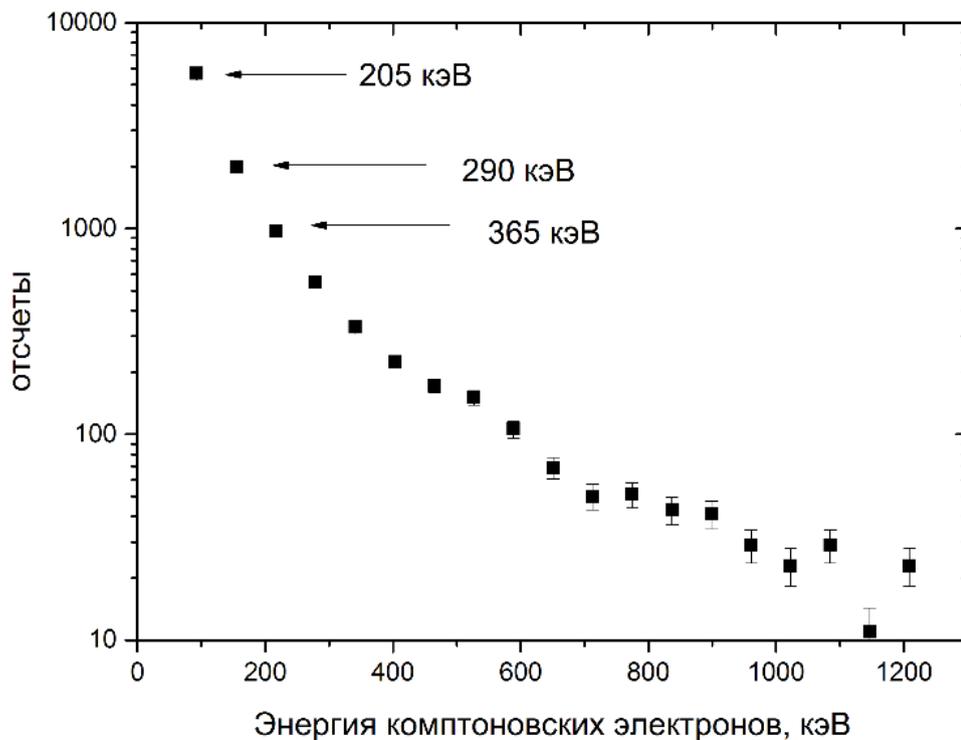
- 1 — соленоид,
 - 2 — LaB₆ катод,
 - 3 — анод,
 - 4 — дополнительный электрод,
 - 5 — водяное охлаждение,
 - 6 — дрейфовая камера
- 

Инжекция в газ



Сигнал сцинтиляционного датчик рентгеновского излучения, расположенного вне камеры ГДЛ. Указывает на наличие электронов с энергией более 100 кэВ при энергии частиц пучка 30 кэВ.

Взаимодействие пучка с газом



Сжатие пучка в ведущем магнитном поле до плотности порядка 10^{12} см^{-3} .

Ионизация газа в области движения пучка.

Возбуждение Ленгмюровской турбулентности около магнитной пробки.

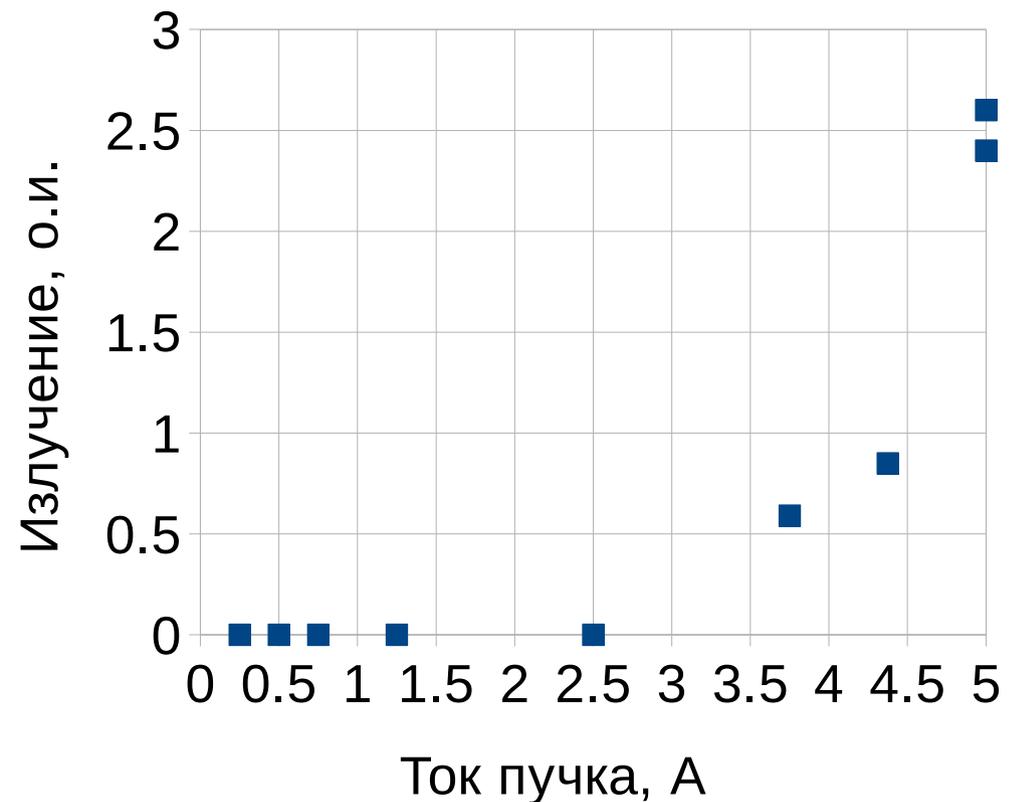
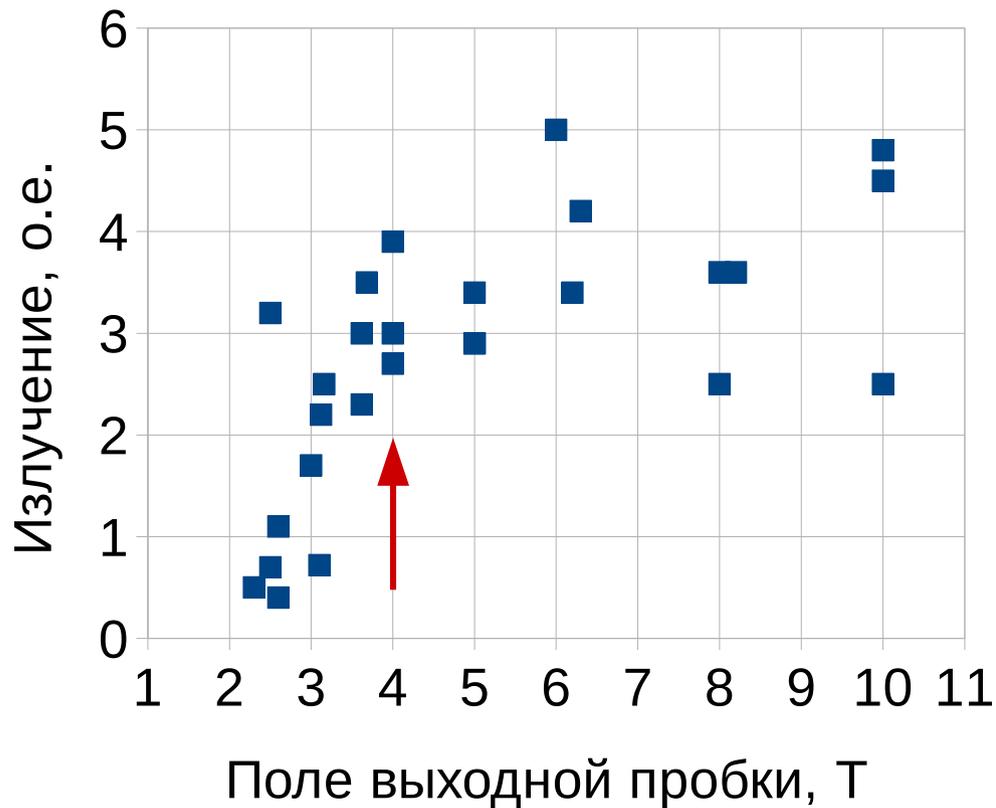
Рассеяние части пучка на турбулентности и формирование популяции захваченных электронов.

Стохастическое ускорение захваченных электронов.

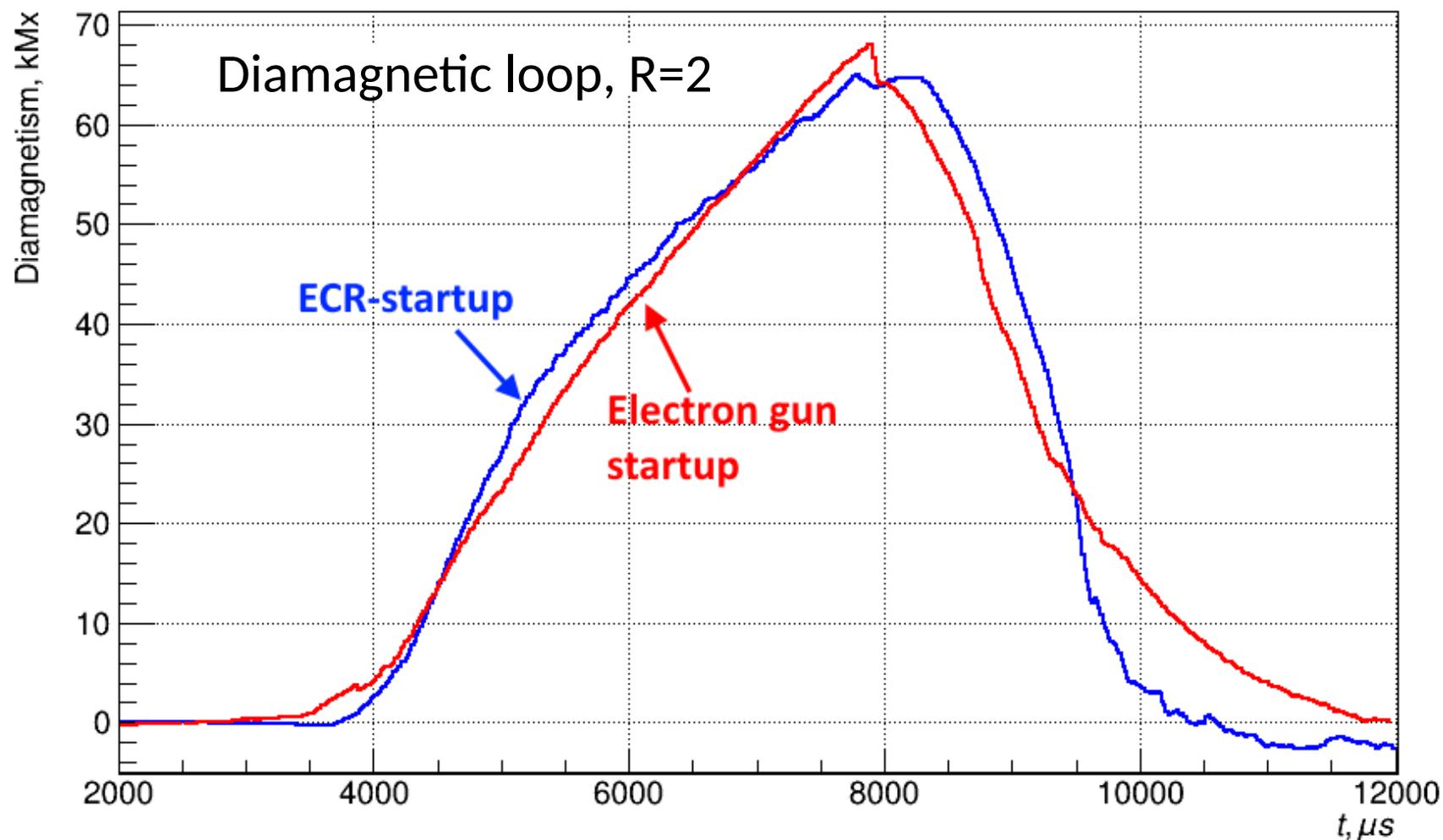
Взаимодействие пучка с газом

Электроны рассеиваются на длине примерно 13 см около входной пробки (поле спадает с 10 до 4 Т).

Резкая зависимость от плотности электронного пучка.



Создание начальной плазмы с помощью электронной пушки



Обычные параметры электронной пушки: 30 кэВ, 10 А.

Проект КОТ

- Работы по проектированию и строительству новой экспериментальной установки КОТ (Компактный Осесимметричный Тороид или САТ - Compact Axisymmetric Toroid) начались в 2017 году.
- Программа исследований ориентирована на изучение удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением в осесимметричном пробкотроне малого объёма с мощной атомарной инжекцией, демонстрацию диамагнитного удержания и обращения поля.
- Основное отличие от прежних установок — более высокая плотность эквивалентного тока нейтральных атомов в пучках благодаря существенному прогрессу ИЯФ в технологиях нейтральной инжекции.



Параметры проекта КОТ

Габариты установки

длина – 6 м;
высота – 5 м;
диаметр камеры – 1 м.

Магнитная система

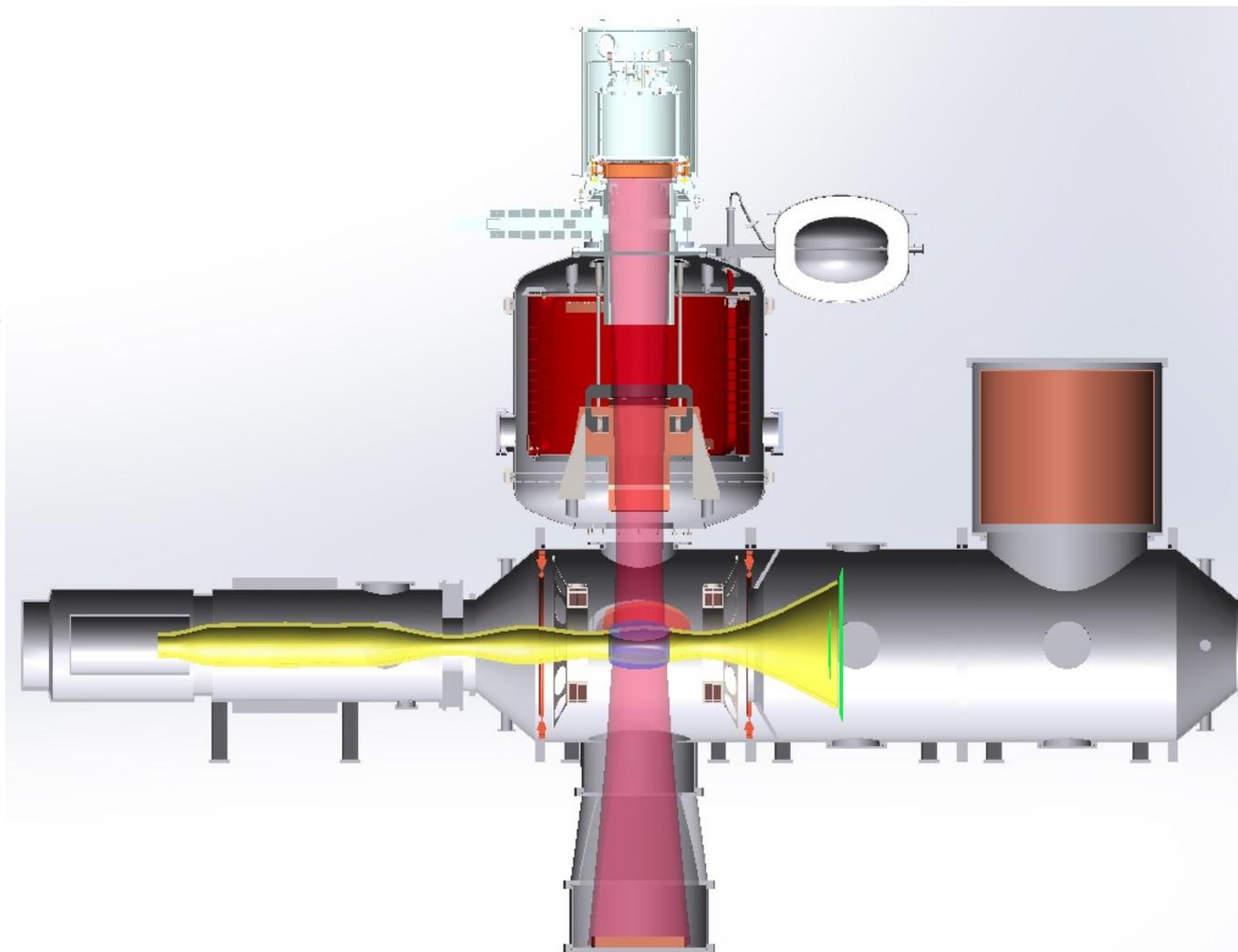
межпробочное расстояние – 0.6 м;
поле в центре – 2 кГс;
пробочное отношение – 2.

Мишенная плазма

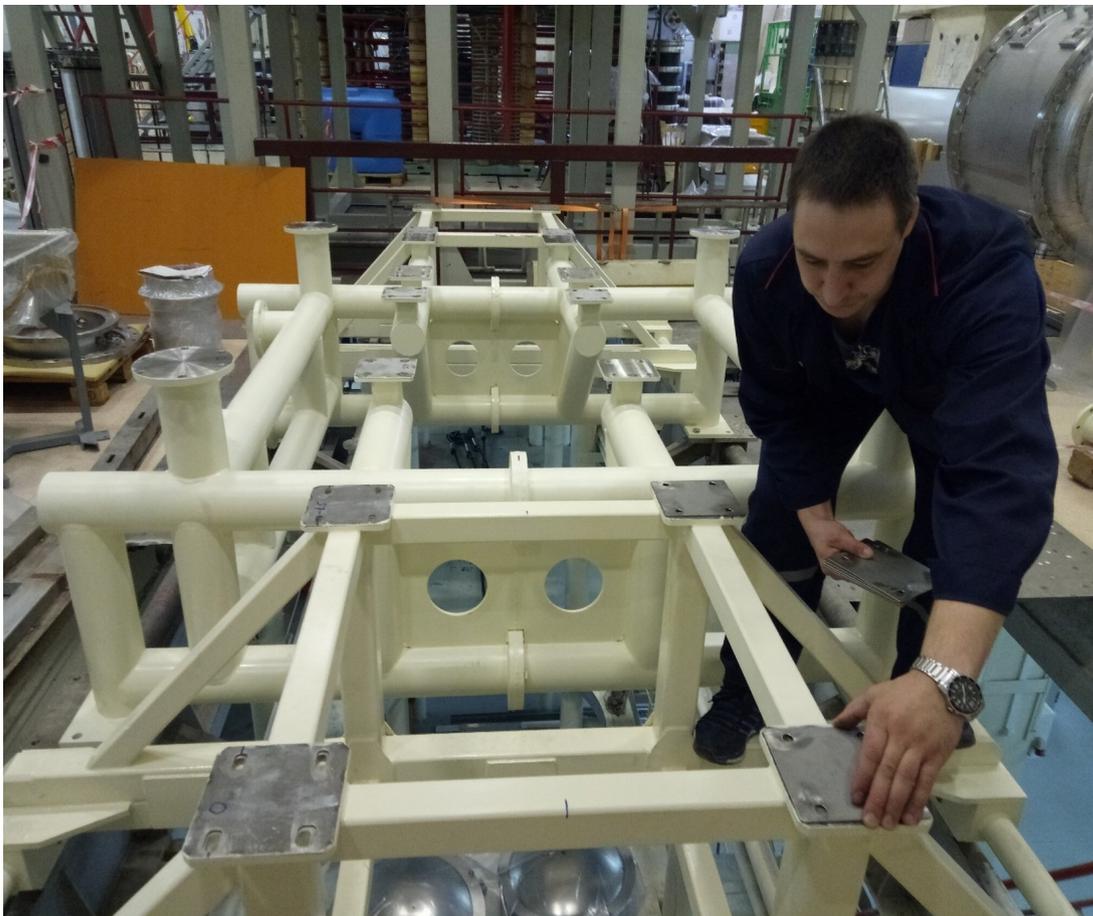
радиус – 10 см;
плотность – $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$;
температура – 20-50 эВ.

Система атомарной инжекции

2 инжектора на энергию 15 кэВ;
мощность – 2x2 МВт;
ток – 2x160 А;
плотность тока в плазме – 3.5 А/см^2
(2ХИВ – 1.6 А/см^2).



Этапы строительства



Монтаж эстакады, апрель 2019 г.



Общий вид установки, январь 2020 г.



КОТ: статус и планы

- В январе этого года состоялся “технический” пуск установки (давление $4 \cdot 10^{-4}$ Па).
- В настоящее время ведутся заключительные работы по монтажу систем питания. Продолжаются работы по сборке нагревных инжекторов.
- 2020 г. – ввод установки в эксплуатацию и начало экспериментов.



Спасибо за внимание!