



# Численное моделирование параметров плазмы дугового источника в источнике поляризованных ионов SPI

А.С. Ауэзов, В.В. Фимушкин, А.Н. Соловьев, К.А. Ившин

Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий, Дубна

А.А. Степаненко

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра плазмы, Москва

Источник поляризованных ионов (**проект SPI**) разрабатывается как высокоинтенсивная установка поляризованных пучков дейтронов и протонов

**Цель проекта** — увеличение интенсивности ускоренных поляризованных пучков на ускорительном комплексе ОИЯИ до  $5 \cdot 10^{10}$  d(p)/импульс,

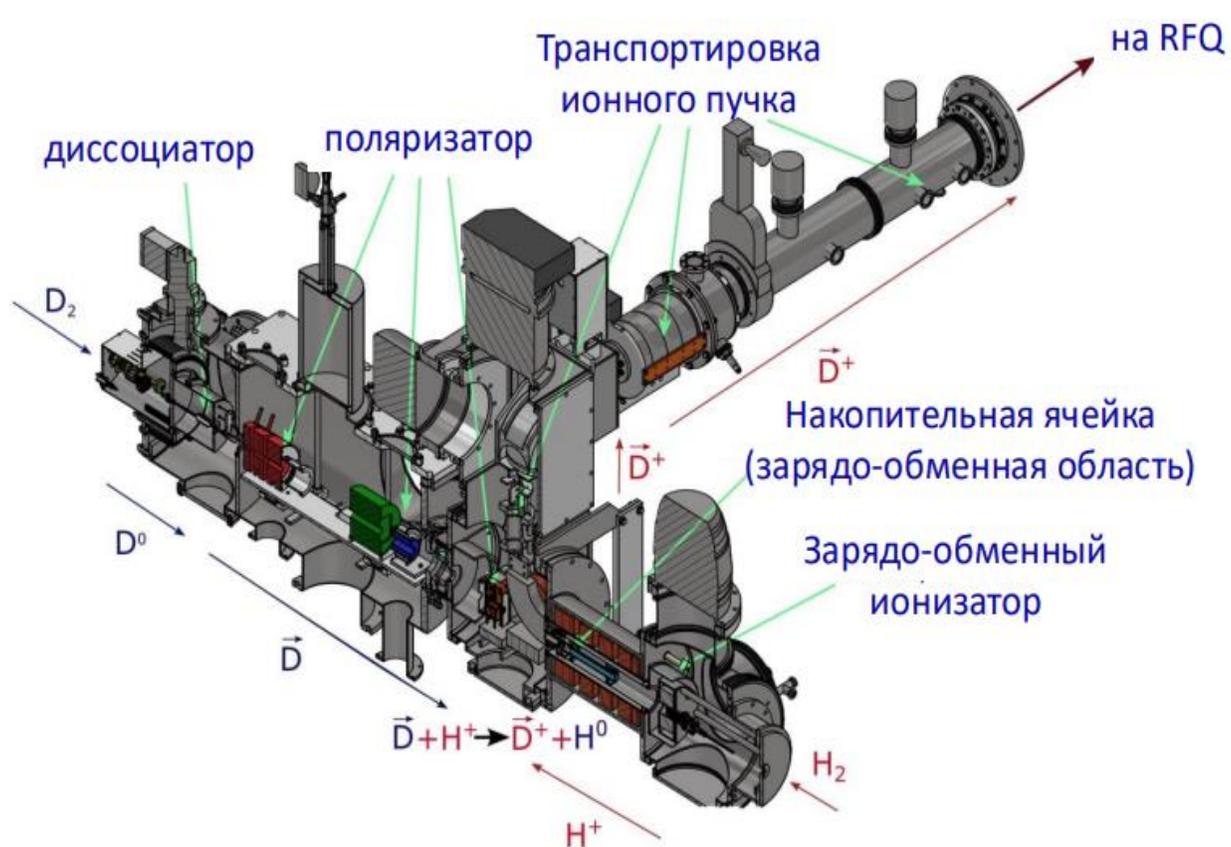
При токе на выходе источника до **10 mA** для  $\uparrow D^+$  ( $\uparrow H^+$ )

Со степенью поляризации  $D^+(H^+)$  до **90%** от максимальной векторной ( $\pm 1$ ) и тензорной ( $+1, -2$ ) поляризаций

**Цель работы** — разработка, численное моделирование и оптимизация параметров дугового источника плазмы для применения в источнике поляризованных ионов (SPI), с целью увеличения интенсивности и степени поляризации ускоренных пучков протонов и дейтронов.

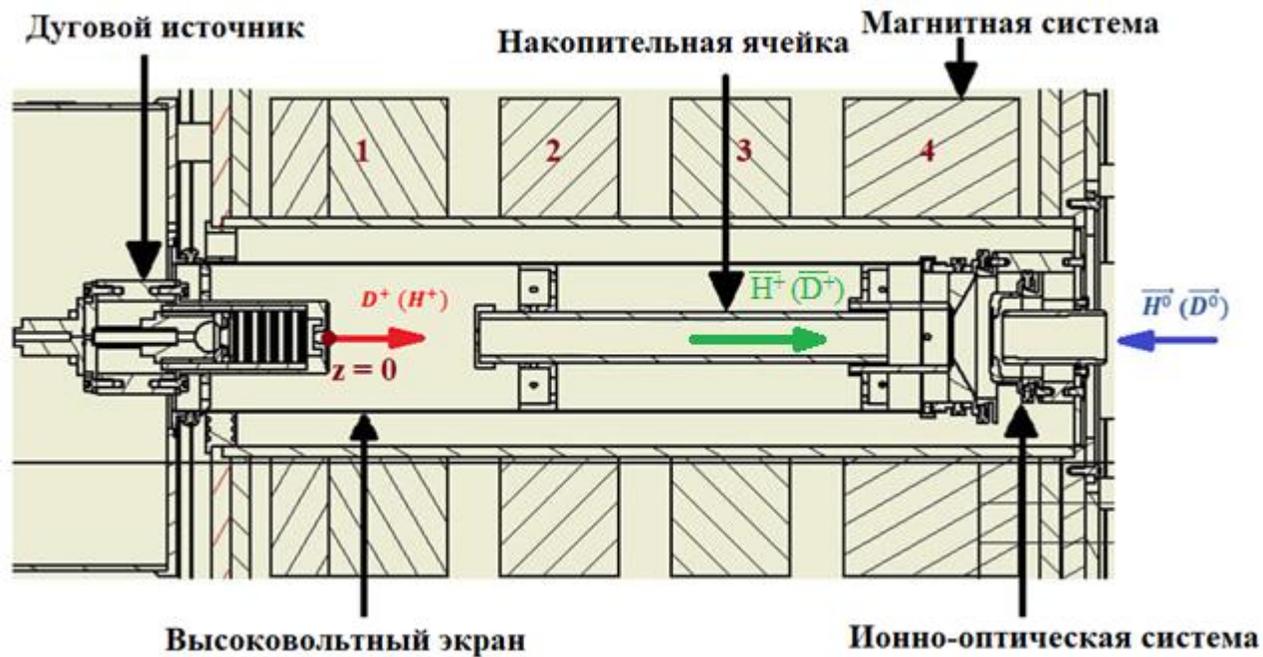
Были поставлены следующие **задачи**:

1. Расчет основных параметров потока плазмы (плотности, температуры и др.) на выходе из сопла плазматрона
2. Исследование пространственного распределения плотности и температуры плазмы.



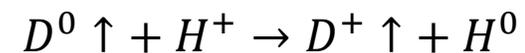
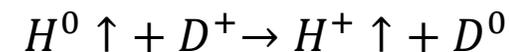
### Источник поляризованных ионов SPI

- Атомы протия и дейтерия производятся радиочастотным методом (диссоциатор)
- Поляризация по электронному спину осуществляется системой постоянных шестиполюсных магнитов, создающих градиентное магнитное поле (поляризатор)
- Для ядерной поляризации частиц используются высокочастотные ячейки сверхтонких переходов (поляризатор)
- Для ионизации атомов используется зарядо-обменный ионизатор с электродуговым источником плазмы



## Зарядо-обменный ионизатор

Зарядо-обменная реакция для поляризованных протонов и дейтронов:



- Эффективность ионизации: 10% <sup>1</sup>
- Использование накопительной ячейки позволило:
  - Увеличить интенсивность поляризованных  $D^+$  ( $H^+$ ) пучков
  - Уменьшить иммитанс поляризованных пучков
  - Значительно сократить поток  $H_2^+$  молекулярных ионов в пучке, который сложно отделить от ионов  $D^+$ .

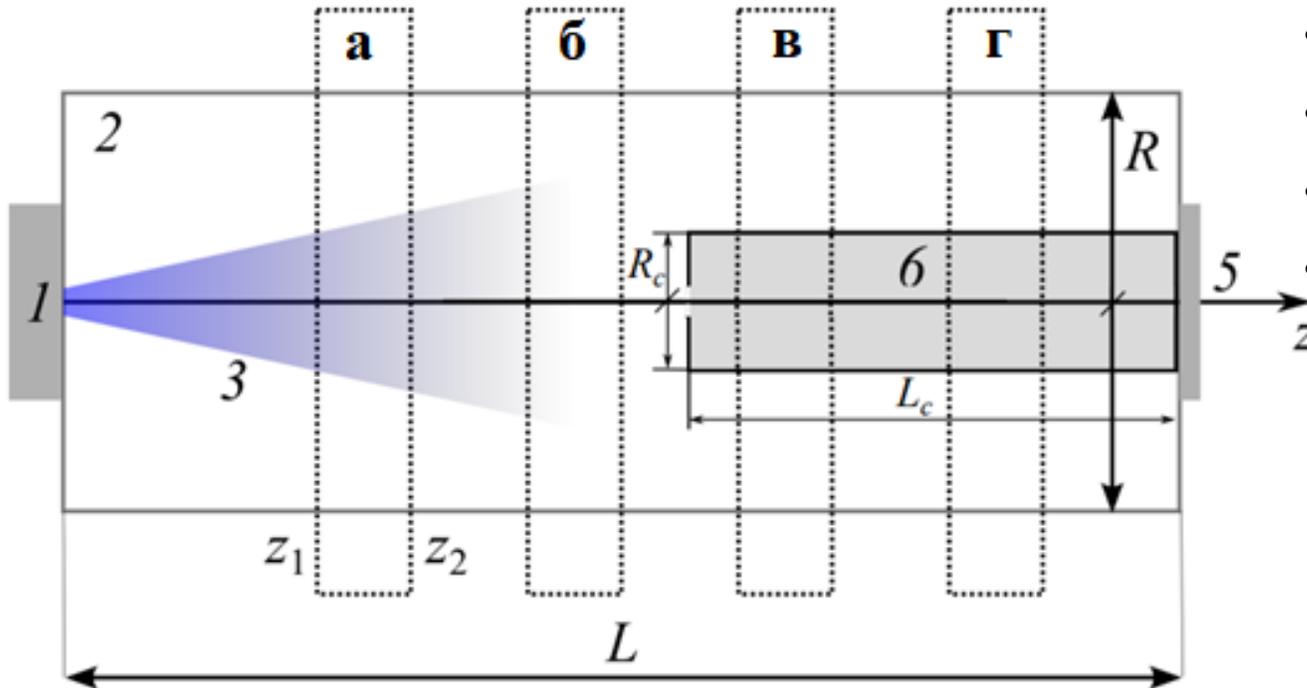
# Используемые приближения

- Течение плазмы амбиполярно – скорости ионов и электронов равны, ток в плазме отсутствует  $j = 0$ .
- Электроны замагничены, ионы не замагничены.
- Перенос тепла ионами – адиабатический, электронами – близок к изотермическому.
- Рециклинг ионов основной плазмы на стенках не учитывается.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Михаил Александрович Леонтович. Вопросы теории плазмы. 1963.

<sup>3</sup> Лебедев В. А., Зеленский А. Н., Белов А.С. и др. Поляризованные источники, поляриметрия, спиновая физика высоких энергий. Дубна: ЛФВЭ ОИЯИ, 2024. Режим доступа: <https://indico.jinr.ru/event/4981> (Дата обращения: 16.11.2024).

# Геометрия задачи



- где 1 – источник плазмы, сопло плазматрона  
 2 – вакуумная камера;  
 3 – поток плазмы;  
 а, б, в, г - катушки магнитного поля;  
 5 – апертура экстрактора ионно–оптической системы;  
 б – накопительная ячейка.

- Длина расчёта  $L = 28.6$  см
- Радиус расчёта  $R = 3.6$  см
- Радиус сопла дугового источника  $\delta_r = 3.5$  мм.
- Радиус накопительной ячейки  $R_c = R/4 = 0.9$  см
- Длина накопительной ячейки  $L_c = 3L/4 = 21.5$  см
- *Магнитное поле* создается четырьмя катушками, геометрические границы  $z_{1,2}$ , число витков  $N_c$  и полный ток  $I_c$ . Средние радиусы катушек  $R_c = 8.85$  см.

Катушки:

- а –  $z_1 = -28$  мм,  $z_2 = 58$  мм,  $N_c^1 = 48$ ,  $I_c^1 = -80$  А.
- б –  $z_1 = 84$  мм,  $z_2 = 142$  мм,  $N_c^2 = 88$ ,  $I_c^2 = 350$  А.
- в –  $z_1 = 168$  мм,  $z_2 = 226$  мм,  $N_c^3 = 88$ ,  $I_c^3 = 350$  А.
- г –  $z_1 = 252$  мм,  $z_2 = 338$  мм,  $N_c^4 = 96$ ,  $I_c^4 = -88$  А.

# Уравнения движения плазмы

Расчет параметров плазмы производился с использованием уравнений непрерывности, баланса энергии и движения ионов плазмы<sup>2, 3</sup>:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n \mathbf{V}) = 0,$$
$$m_i n \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla [n(T_i + T_e)] - 0.71 n \nabla T_e - m_i n \omega_{ci} \mathbf{V} \times \mathbf{b},$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

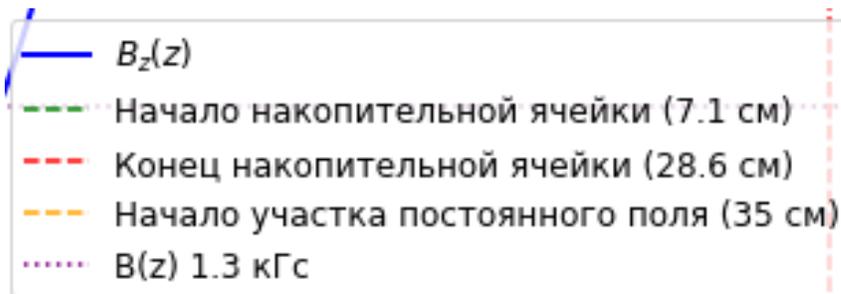
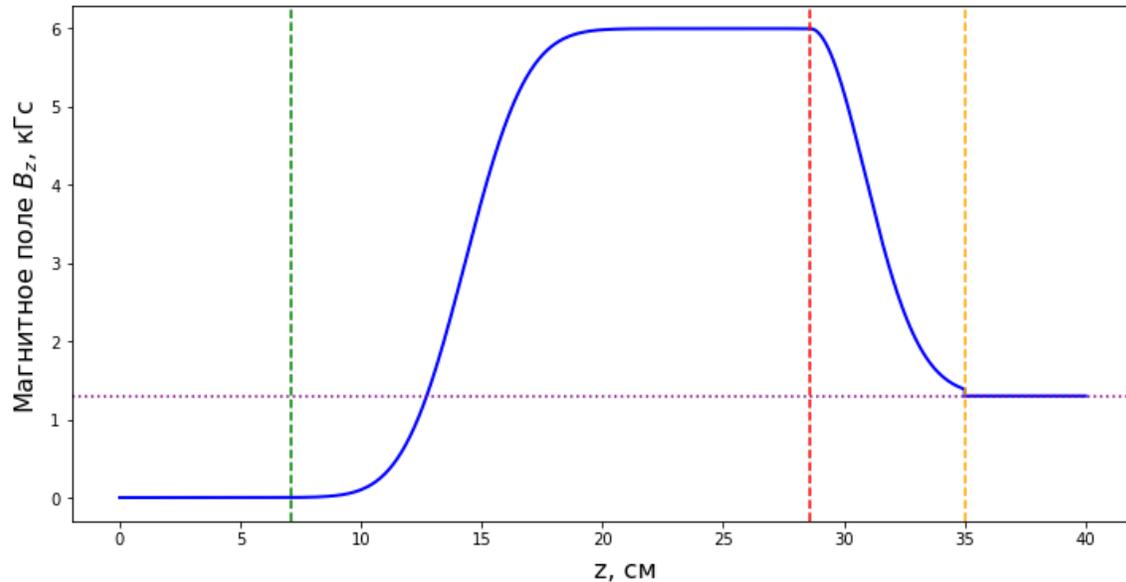
- Граничные условия на стенках:  $V_n = 0, \partial_n f = 0$ .
- Граничные условия в области свободного течения (отверстия и каналы):  
 $\partial_n V_n = 0, \partial_n f = 0$ .
- Сопло дугового источника:

$$V_z(r, 0, t) = V_0, V_r(r, 0, t) = V_\theta(r, 0, t) = 0,$$
$$n(r, 0, t) = n_0 H(r_{\text{nozzle}} - r), T(r, 0, t) = T_0 H(r_{\text{nozzle}} - r).$$

<sup>2</sup> Михаил Александрович Леонтович. Вопросы теории плазмы. 1963.

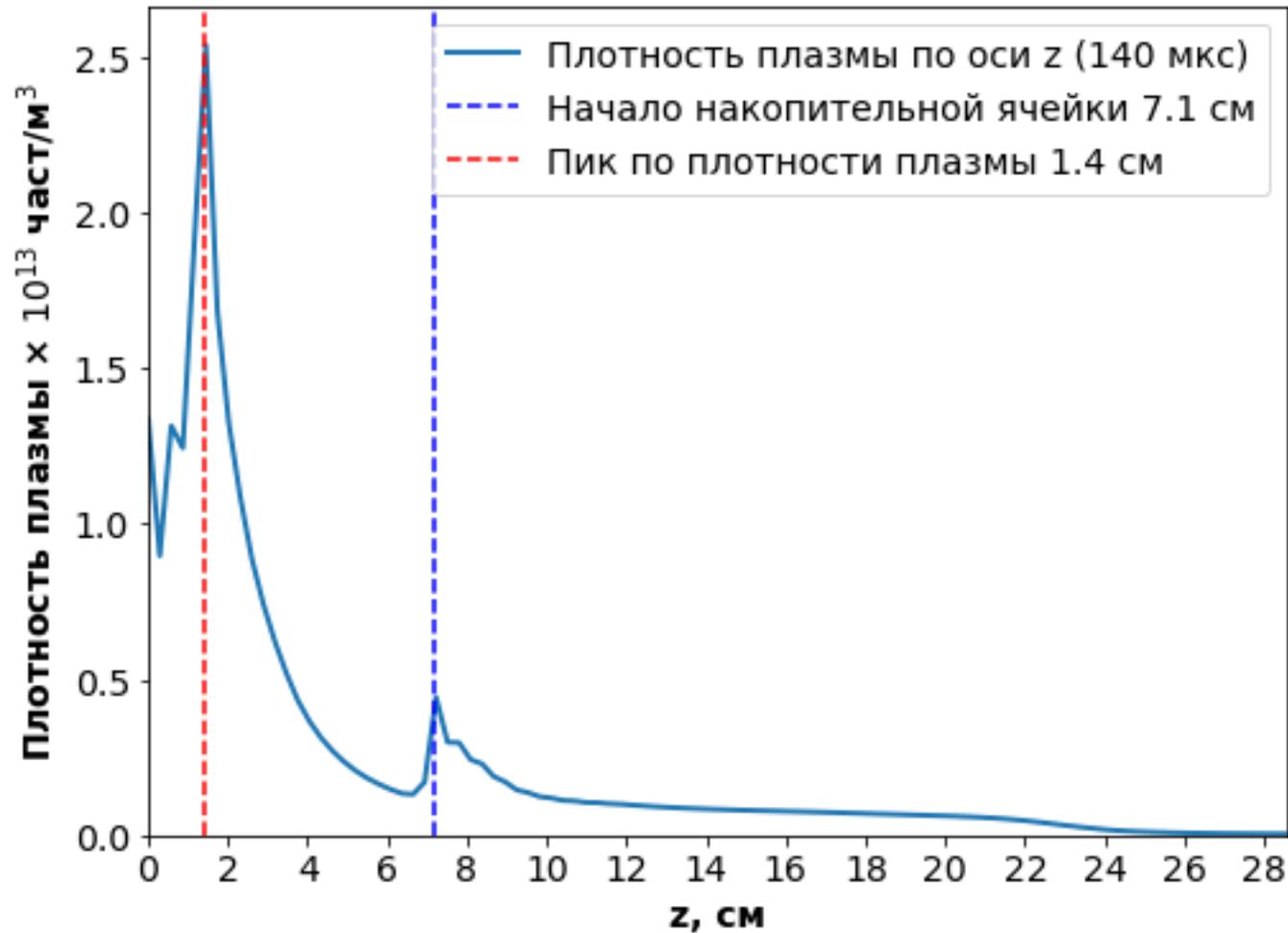
<sup>3</sup> Лебедев В. А., Зеленский А. Н., Белов А.С. и др. Поляризованные источники, поляриметрия, спиновая физика высоких энергий. Дубна: ЛФВЭ ОИЯИ, 2024. Режим доступа: <https://indico.jinr.ru/event/4981> (Дата обращения: 16.11.2024).

# Параметры расчёта



- Расчёты и моделирование выполнялись с использованием библиотеки BOUT++<sup>4</sup>
- Плотность тока  $j \approx 1$  кА/см<sup>2</sup>.
- *Плотность и температура* окружающей среды:  
 $n_{amb} = 4,2 \cdot 10^{16}$  част./м<sup>3</sup>,  $T_{amb} = 0.03$  эВ  $\approx 300$  К.
- Показатель политропы для плазмы совпадает с показателем адиабаты,  $\gamma = 5/3$ .
- В качестве рабочего вещества использовался дейтерий, массовое и зарядовое числа ионов  $A = 2$ ,  $Z = 1$ .
- Время выхода дугового источника на рабочий режим полагается много меньшим длительности импульса плазмы  $t_p$ .

<sup>4</sup>B.D. Dudson, M.V. Umansky, X.Q. Xu, P.B. Snyder, and H.R. Wilson. Bout++: A framework for parallel plasma fluid simulations. Computer Physics Communications, 180(9):1467–1480, 2009.



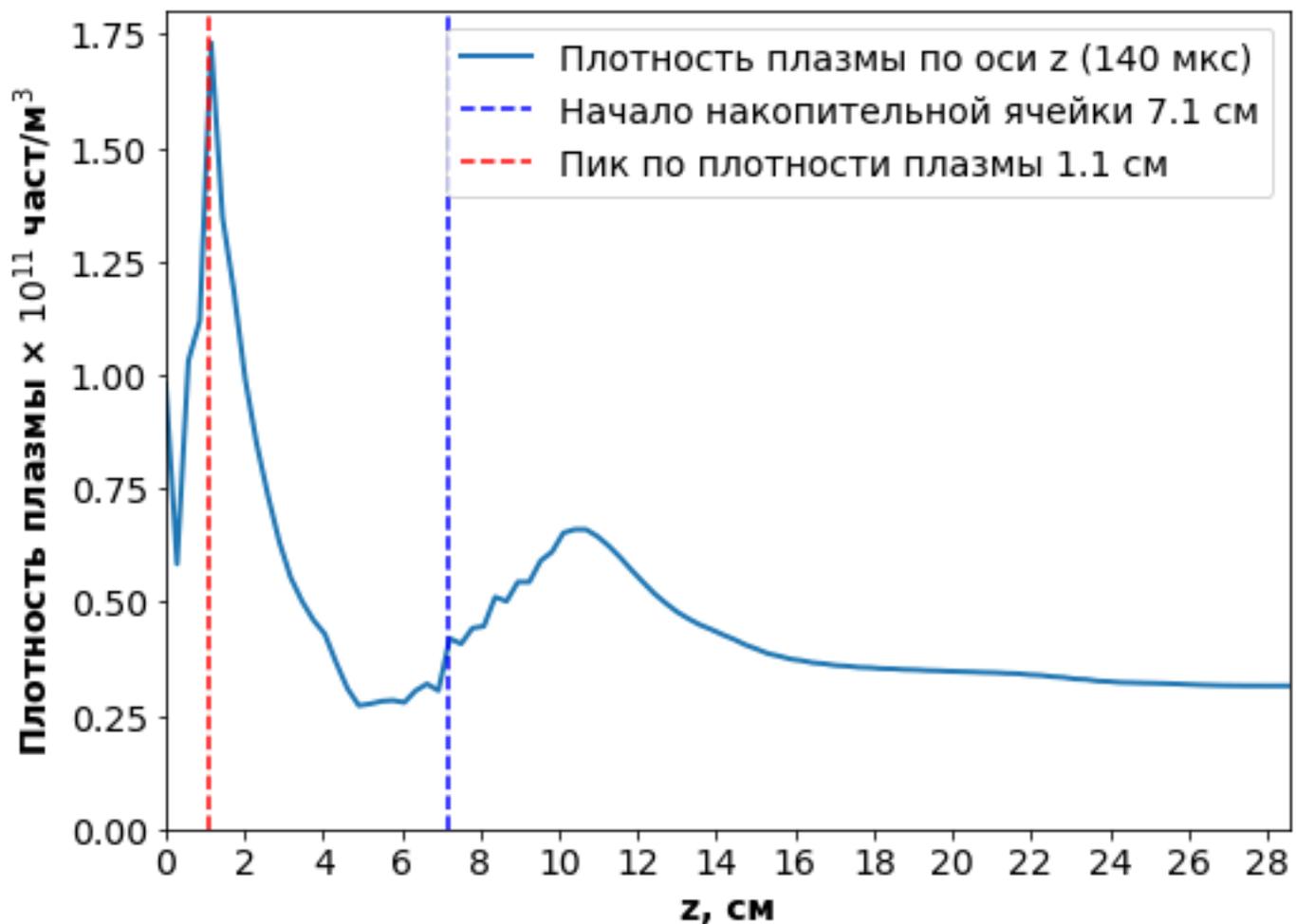
**Распределение плотности плазмы  
при  $n_{nozzle} = 10^{20}$  част./м<sup>3</sup>**

Параметры потока плазмы на выходе из сопла  $n_{nozzle} = 10^{20}$  част./м<sup>3</sup>,  $T_{nozzle} = 5$  эВ,  $V_{nozzle} = 60$  км/с. Время длительности импульса плазмы  $t_p = 140$  мкс.

Ось  $z$  – горизонтальная ось, указывает на расстояние от сопла дугового источника.

При 1,4 см плотность плазмы максимальна и резко снижается, указывая на быструю диффузию или расширение плазмы по мере удаления от сопла.

При 7,1 см от сопла плазматрона, наблюдается небольшой локальный пик, что может свидетельствовать о взаимодействии с накопительной ячейкой.



**Распределение плотности плазмы по радиусу,  
при  $n_{nozzle} = 10^{18}$  част./м<sup>3</sup>**

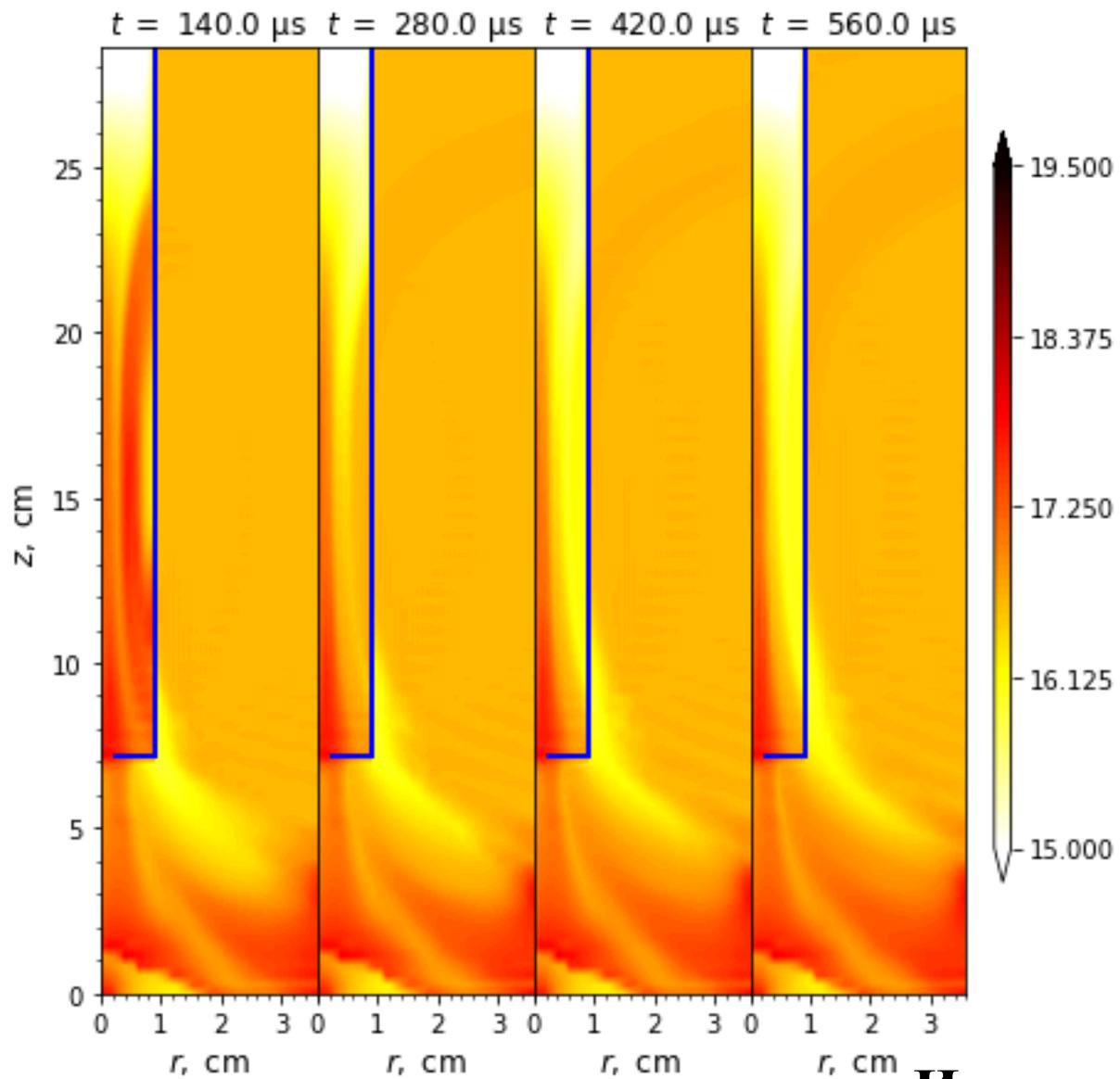
Параметры потока плазмы на выходе из сопла  $n_{nozzle} = 10^{18}$  част./м<sup>3</sup>,  $T_{nozzle} = 5$  эВ,  $V_{nozzle} = 60$  км/с. Время длительности импульса плазмы  $t_p = 140$  мкс.

Пик по плотности плазмы сместился влево.

В накопительной ячейке, присутствует магнитная ловушка, создающая магнитную пробку. Это приводит к перераспределению плотности плазмы и появлению локального максимума вблизи 10-12 см.

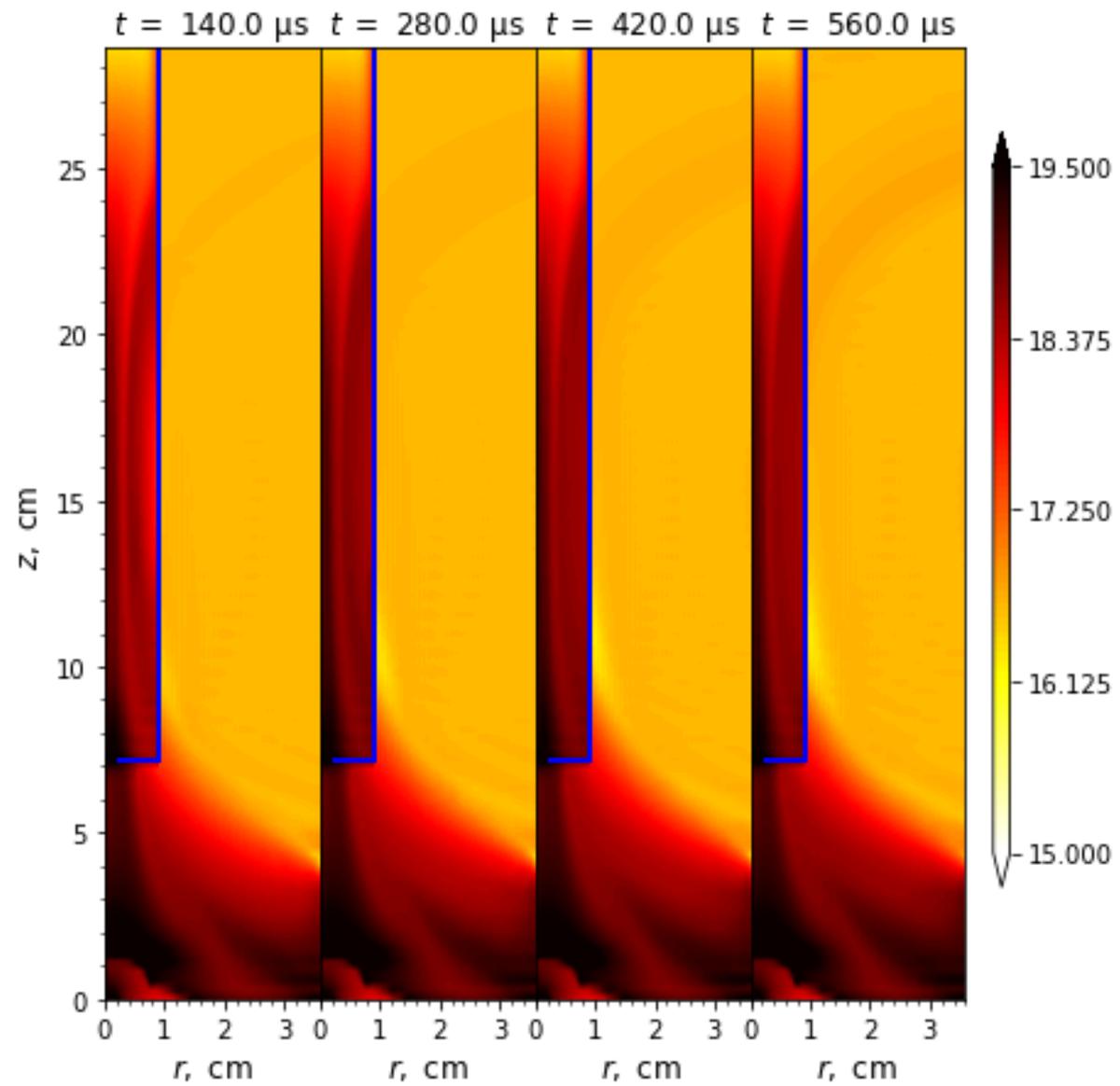
Магнитная пробка является эффективным способом удержания и ограничения движения заряженных частиц в плазме.

Дальнейшее изучение распределения магнитных полей и их влияния на параметры плазмы могло бы помочь лучше понять и смоделировать эти нелинейные пространственные эффекты



Распределение плотности плазмы  $\lg n$ ,  
 при  $n_{\text{nozzle}} = 10^{18}$  част./м<sup>3</sup>

### Источник плазмы



Распределение плотности плазмы  $\lg n$ ,  
 при  $n_{\text{nozzle}} = 10^{20}$  част./м<sup>3</sup>

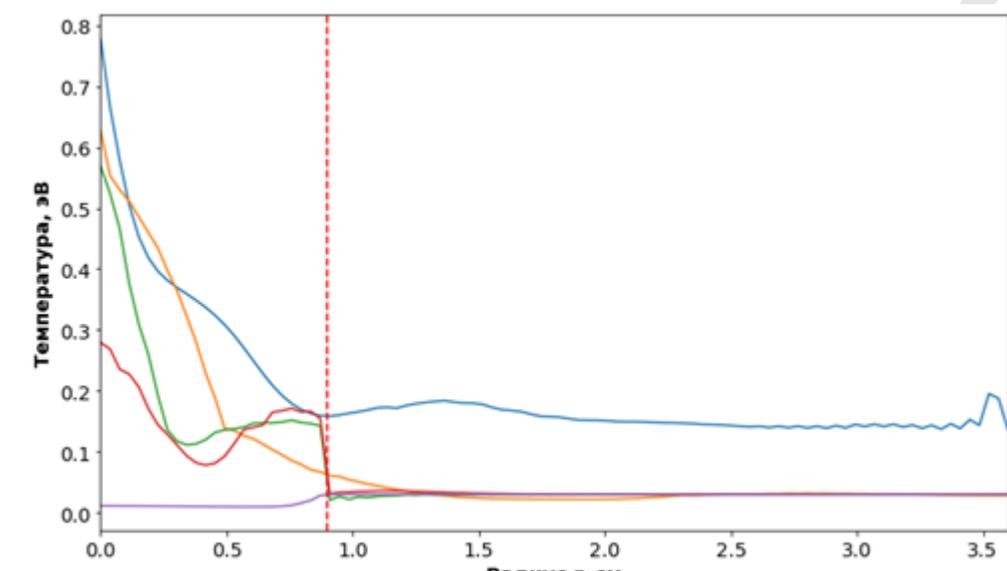
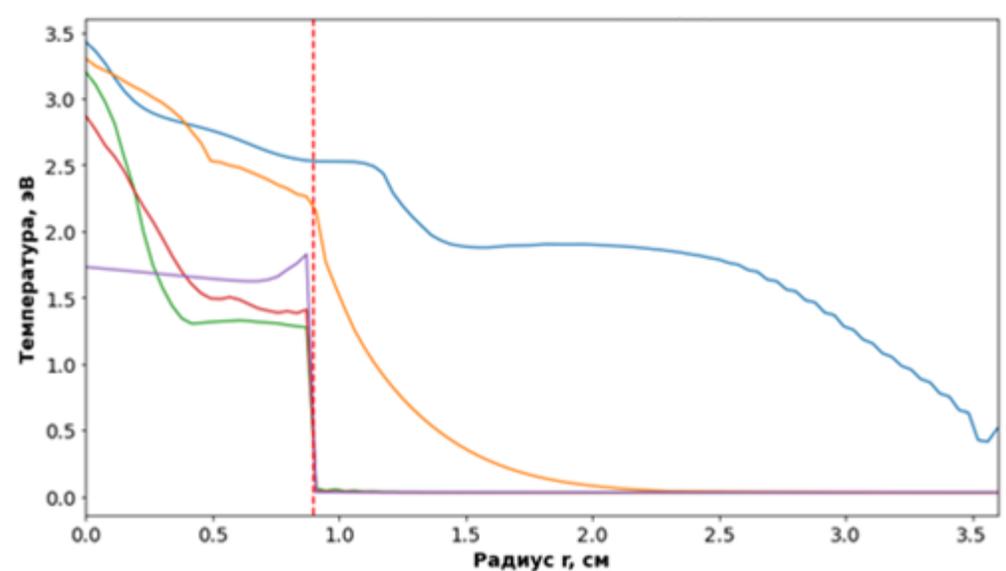
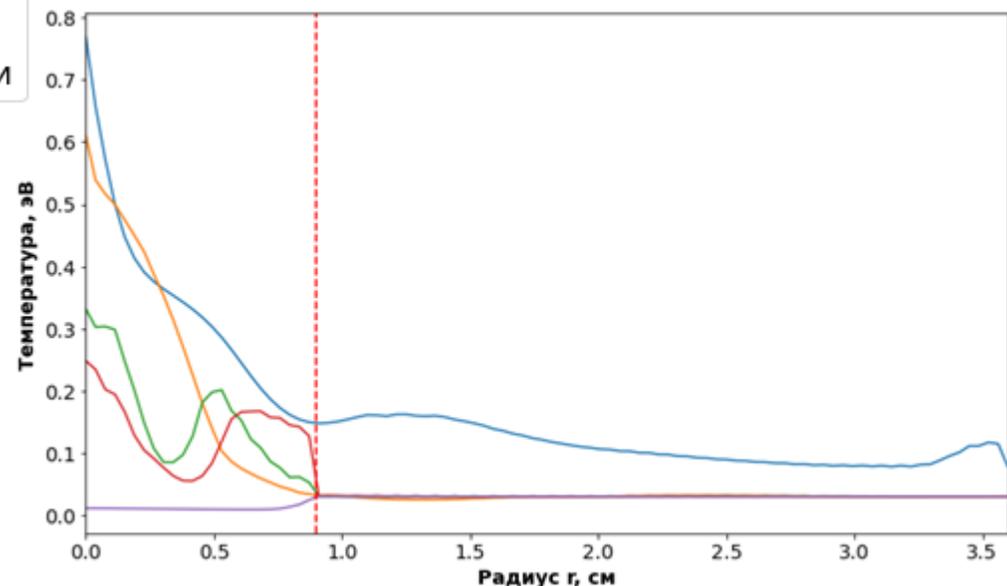
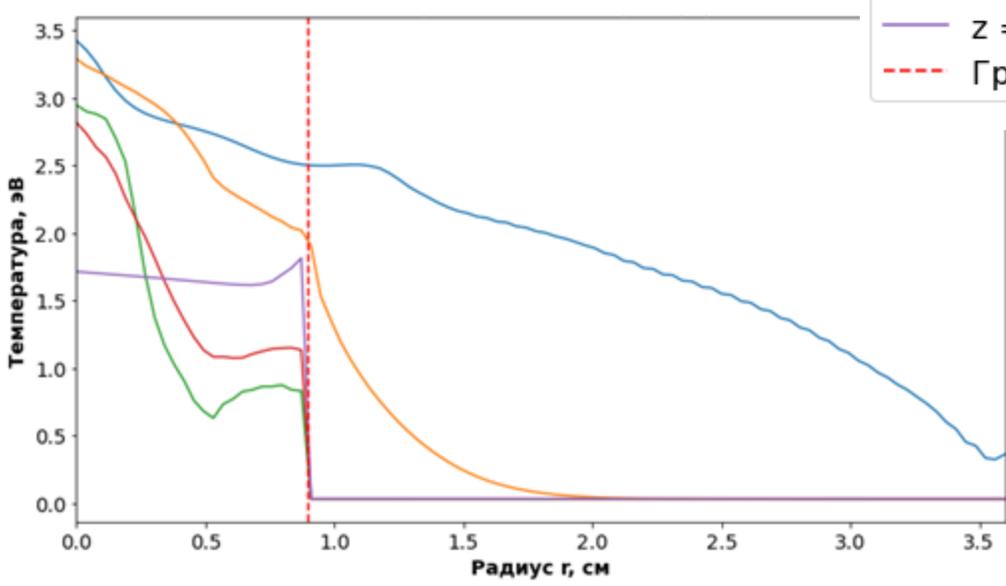
## Температура электронов по радиусу

## Температура ионов по радиусу

- $z = 3.5$  см
- $z = 7.0$  см
- $z = 14.0$  см
- $z = 21.0$  см
- $z = 28.0$  см
- - - Граница накопительной ячейки

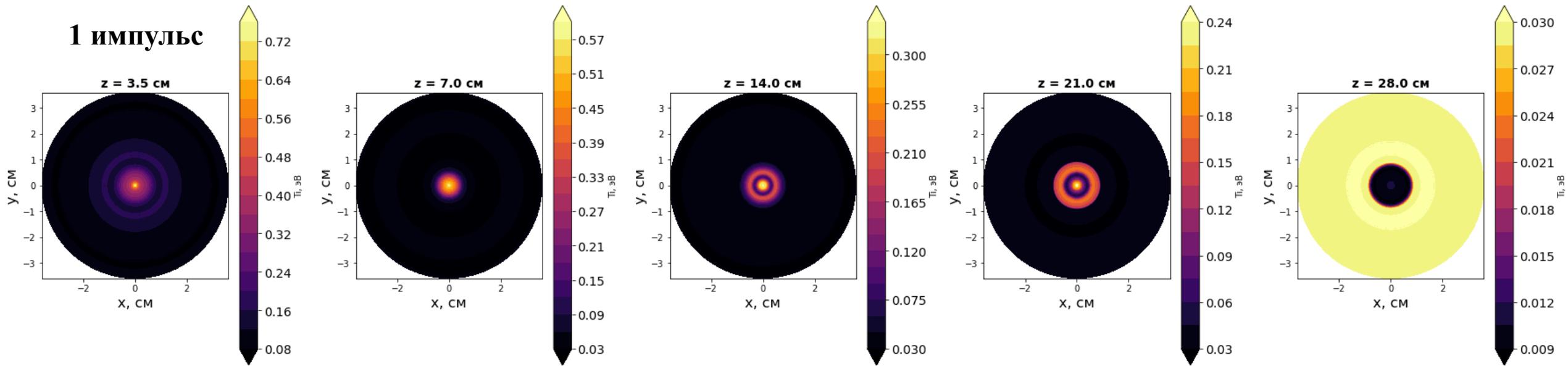
Время импульса  
плазмы  
 $140 \text{ мкс} \approx 1$  импульс

$480 \text{ мкс} \approx 4$  импульса

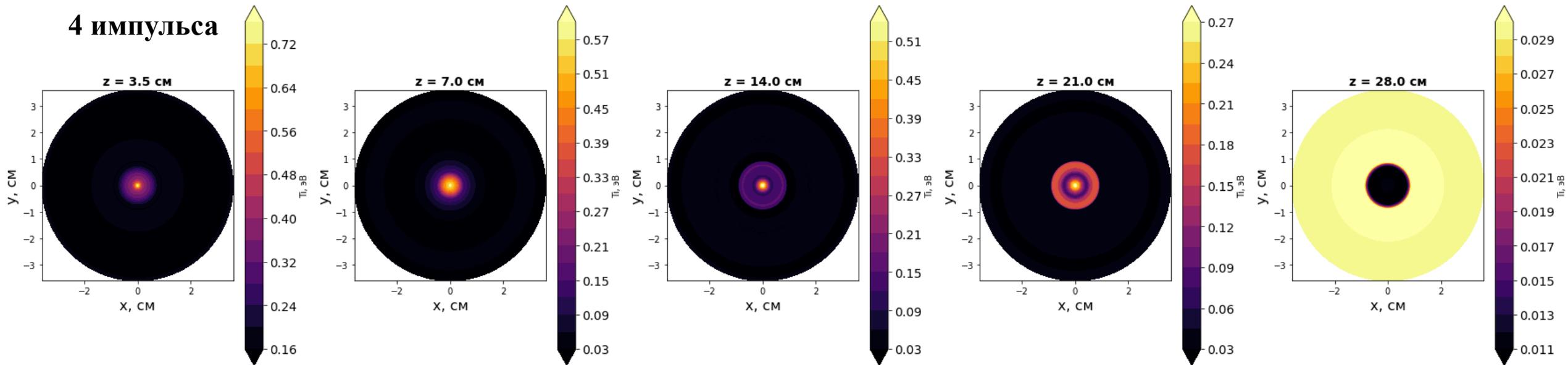


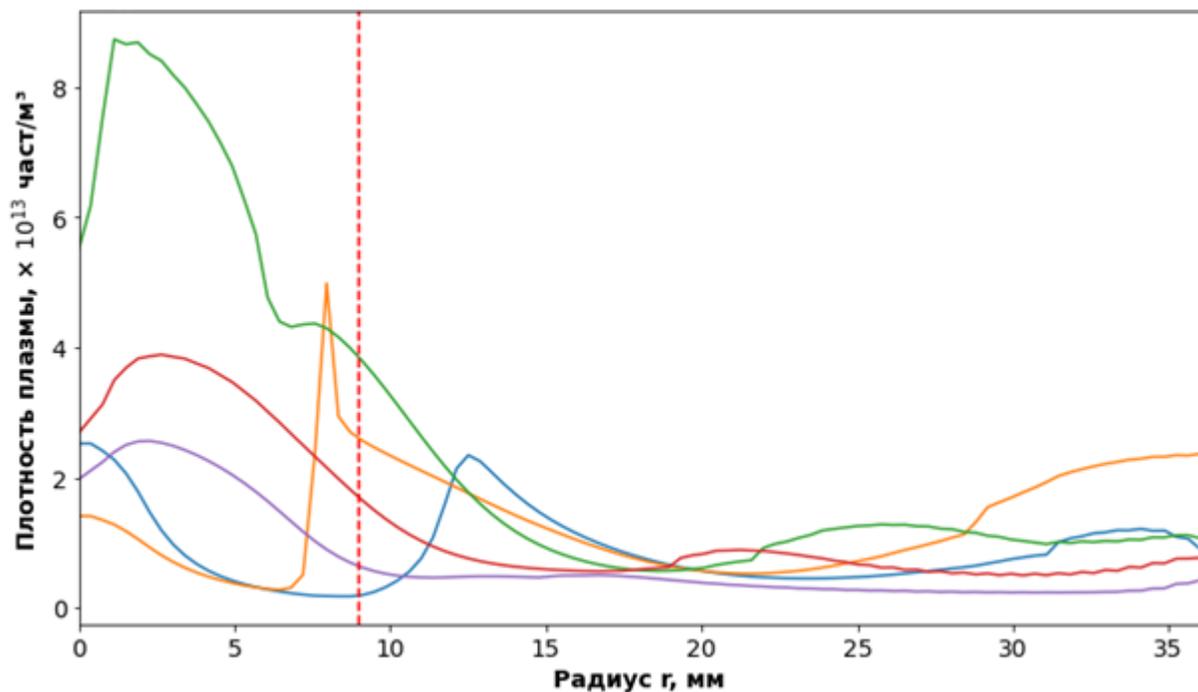
# Профиль сечения температуры ионов по оси z от сопла плазматрона

1 импульс



4 импульса





## Распределение плотности плазмы по радиусу



График показывает распределение плотности плазмы в зависимости от радиального расстояния (r) от плазматрона для различных продольных положений (z).

- Пики плотности плазмы становятся более выраженными и сдвигаются в сторону больших радиусов по мере удаления от источника плазмы (увеличения z).
- На расстоянии около 7.1 см отмечена граница накопительной ячейки, которая влияет на распределение плотности плазмы.
- При больших радиусах ( $r > 20$  мм) плотность плазмы стремится к нулю для всех продольных положений, указывая на ограниченные размеры плазменного потока.



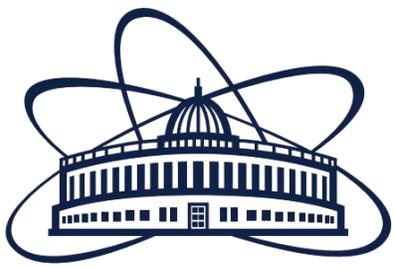
**Внешний вид зонда  
Ленгмюра**

Параметры зонда Ленгмюра	Значение	Назначение
ВАХ	Измеряется	Позволяет определять локальные параметры плазмы: плотность и температуру электронов.
Генерация пилообразного напряжения	До 100 В, 0,1–8 мс, 1–100 Гц	Требуется для получения ВАХ. Удобство настройки параметров (амплитуда, длительность, частота) позволяет адаптировать зонд к различным типам плазмы
Гальваническая изоляция	1500 В	Обеспечивает минимальное влияние измерительных цепей на плазму, особенно в режиме двойного зонда
Полоса пропускания	50 кГц	Позволяет работать с высокочастотными или нестационарными процессами в плазме.
Одновременная регистрация тока и напряжения	Да	Позволяет более точно регистрировать ВАХ для последующего анализа.
Количество разрядов АЦП	16 бит	Обеспечивает высокую точность оцифровки сигналов.
Режим двойного зонда	Поддерживается	Позволяет измерять параметры высокочастотной или нестабильной плазмы без значительных возмущений
Амплитуда сигнала	До 100 В	Широкий диапазон настройки позволяет работать с различными типами плазмы.
Диапазоны измерения тока	10 мкА, 100 мкА, 1 мА, 10 мА	
Размеры блока, м	0,5 × 0,5 × 0,2	
Масса оборудования	20 кг	

# Заключение

- Проведенный анализ распределения плотности плазмы показывает, что увеличение плотности не приводит к положительному эффекту. Напротив, это может увеличивать нестационарное распределение параметров плазмы.
- Температура электронов недостаточна для эффективной ионизации посредством электронного удара.
- Магнитная пробка внутри накопительной ячейки является эффективным способом удержания и ограничения движения заряженных частиц в плазме. Дальнейшее изучение распределения магнитных полей и их влияния на параметры плазмы могло бы помочь лучше понять и смоделировать эти нелинейные пространственные эффекты.
- Важно отметить, что длительность импульса и количество импульсов не оказывают значительного влияния на распределение плотности плазмы.

Для дальнейшего изучения данных процессов требуется получение экспериментальных данных с использованием зонда Ленгмюра. Экспериментальные измерения позволят подтвердить или скорректировать выводы моделирования, обеспечив более глубокое понимание физических процессов на выходе дугового источника. Полученные результаты и последующие исследования будут способствовать оптимизации параметров нового дугового источника.



# Спасибо за внимание!

А.С. Ауэзов, В.В. Фимушкин, А.Н. Соловьев, К.А. Ившин

Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий, Дубна

А.А. Степаненко

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра плазмы, Москва

## Магнитное поле катушки

$$\hat{B}_r = M_r^{(0)} x \left[ \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^{3/2}} - \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^{3/2}} \right] +$$

$$M_r^{(1)} x^3 \left[ \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^{7/2}} - \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^{7/2}} \right],$$

$$\hat{B}_z = M_z^{(0)} \left[ \frac{y - y_1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^2)^{1/2}} + \frac{y_2 - y}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^2)^{1/2}} \right] +$$

$$M_z^{(1)} x^2 \left[ \frac{y - y_1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^2)^{3/2}} + \frac{y_2 - y}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^2)^{3/2}} \right]$$

где  $x = r/R$ ,  $y = z/L$ ,  $\alpha = (R_c/R)^2$ ,  $\beta = (L/R)^2$ ,  $R_c$  – средний радиус катушки,  $z_1, z_2$  –  $z$  координаты границ катушки. Коэффициенты  $M_r, M_z$  заданы соотношениями

$$M_r^{(0)} = \frac{\mu_0 J}{B_x} \alpha, \quad M_r^{(1)} = \frac{45\mu_0 J}{96B_x} \alpha^2,$$

$$M_z^{(0)} = \frac{\mu_0 J}{2B_x} \beta^{1/2}, \quad M_z^{(1)} = \frac{\mu_0 J}{4B_x} \beta^{1/2}$$

Табл. 1. Технические характеристики

№ п/п	Параметры	Требование
1	Выносной измерительный блок для установки вблизи Электродов зонда в металлическом корпусе.	Да
2	Генератор пилообразного напряжения должен генерировать одиночные и периодические пилообразные напряжения с заданной амплитудой, длительностью и частотой	Да
3	Выход пилообразного напряжения гальванически изолирован	Да
4	Гальваническая изоляция каналов измерения тока и напряжения, В	1500
5	Полоса пропускания гальванической изоляции измерения тока и напряжения, кГц	50
6	Одновременная регистрация тока и напряжения по гальванически изолированным каналам	Да
7	Возможность синхронизации генератора от внешнего источника, циклического или ручного запуска	Да
8	Амплитуда генерируемого сигнала, В	100
9	Диапазон регулирования длительности генерируемого сигнала, мс	0,1- 8
10	Частота генерируемого сигнала, Гц	100
11	Возможность регулирования частоты генерируемого сигнала от 1Гц	Да
12	Количество разрядов аналого-цифрового преобразователя (АЦП), бит	16
13	Протокол удаленного управления TCP/IP. Управление по принципу клиент-сервер с асинхронной передачей данных клиенту	Да
14	Индикатор амплитуды, длительности, частоты на передней панели корпуса, а также по интерфейсу	Да
15	Выбор способа запуска на передней панели корпуса, а также по интерфейсу	Да
16	Выбор и отображение диапазонов напряжения и тока на передней панели, а также по интерфейсу	Да
17	Микроконтроллер с цифровым сигнальным процессором и со-процессором для операций с плавающей точкой	Да
18	Тактовая частота микроконтроллера, МГц	480
19	Объем флэш-памяти микроконтроллера, Мб	2
20	Объем ОЗУ памяти микроконтроллера, Мб	1
21	Четыре диапазона измерения тока: 10 мкА; 100 мкА; 1 мА; 10мА	Да

22	Возможность пропорционального нормирования диапазона измерения тока под задачу	Да
23	Клиент на базе кроссплатформенного фреймворка на языке C++ со свободной лицензией	Да
24	Графическое отображение данных	Да
25	Обработка вольтамперной характеристики двойного зонда	Да
26	Сохранение данных	Да
27	Сохранение последней осциллограммы	Да
28	Программное обеспечение для удаленного управления блоком по сети Ethernet и записи измеренных данных	Да
29	Размеры внешнего корпуса блок питания с микроконтроллером, м	0,5*0,5*0,2
30	Масса оборудования, кг	20

