

Численное исследование переноса плазмы и поляризованных частиц в Источнике поляризованных ионов SPI

А.А. Степаненко, К.А. Ившин, А.Н. Соловьев, В.В. Фимушкин,
В.И. Давыденко, Н.В. Ступишин, А.С. Белов, А.Н. Зеленский

Кафедра физики плазмы
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Лаборатория физики высоких энергий
Объединённый институт ядерных исследований

«Поляризованные источники, поляриметрия, спиновая физика высоких
энергий на Ускорительном комплексе ЛФВЭ ОИЯИ»
30-31 октября 2024 года, Дубна
Работа выполнена при финансовой поддержке ОИЯИ

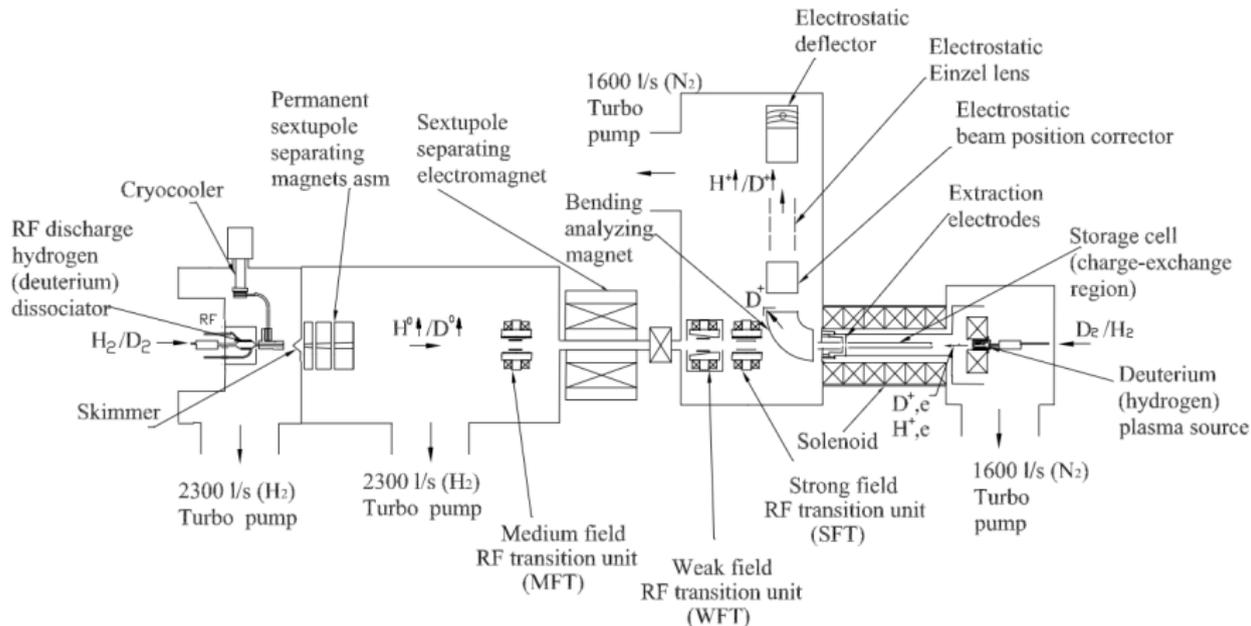
Мотивация I

- Среди вопросов, включенных в программу исследований на действующем и строящемся ускорителях Nuclotron и NICA, – физика взаимодействия поляризованных ядер H/D.
- Для формирования пучков поляризованных ядер на базе Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ создан и действует «Источник поляризованных ионов» SPI.
- Установка позволяет получать поток поляризованных ионов в результате конверсии пучка поляризованных нейтралов в потоке плазмы. Характерные значения получаемых токов поляризованных ионов $H/D \lesssim 10$ мА.
- Эффективность конверсии нейтралов и экстракции поляризованных ионов зависит от многих параметров источника – конфигурации магнитного поля соленоида, режимов работы ионизатора, геометрии накопительной ячейки и др.

Мотивация II

- **Цель работы** – изучение механизмов, определяющих перенос плазмы и поляризованных нейтралов в источнике SPI, и определение путей повышения эффективности конверсии нейтральных частиц в ионы с их последующей экстракцией из установки.

Схема SPI [Fimushkin et al. PoS 2015]



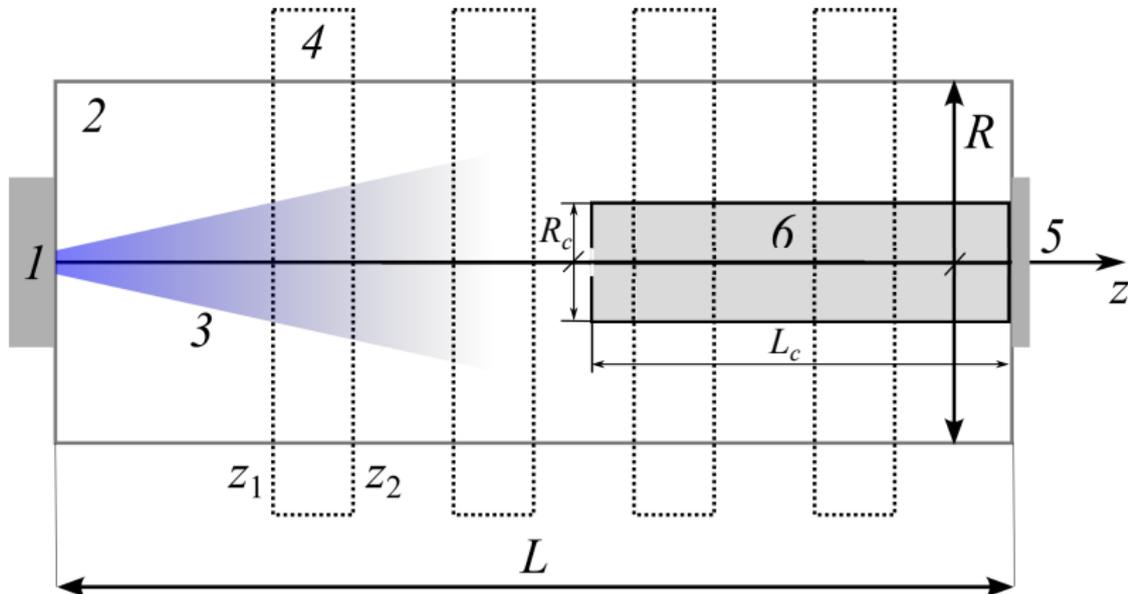
Модель переноса плазмы в установке I

- 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.
- ▶ Магнитное поле стационарно, создаётся системой из 4 катушек, расположенных соосно с вакуумной камерой.
- ▶ Основной канал ионизации поляризованных нейтралов – резонансная перезарядка.
- ▶ До ионизации нейтралы движутся свободно, упруго отражаясь только от стенок установки.
- ▶ Ионизация нейтрала рассчитывается с использованием метода Монте-Карло.

Модель переноса плазмы в установке II

- ▶ Геометрия задачи:



Модель переноса плазмы в установке III

- Уравнения движения плазмы

- ▶ В объёме установки:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{V}) = 0,$$

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

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T_i + (\gamma_i - 1) T_i \nabla \cdot \mathbf{V} = 0,$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T_e + (\gamma_e - 1) T_e \nabla \cdot \mathbf{V} = 0.$$

- ▶ 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 плазмотрона: $V_z(r, 0, t) = V_0$, $V_r(r, 0, t) = V_\theta(r, 0, t) = 0$, $n(r, 0, t) = n_0 H(r_{nozzle} - r)$, $T(r, 0, t) = T_0 H(r_{nozzle} - r)$.
- ▶ Начальные условия: $f(r, z, 0) = f_0(r, z)$ – непринципиальны для расчётов, т.к. рассматривается выход системы на стационар.

Модель переноса плазмы в установке IV

- Уравнения динамики поляризованных частиц:

- Уравнение движение частицы:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = Z_p e \left(E + \frac{1}{c} V_p \times B \right) - \text{sgn}(Z_p) \mu_{ip} \nu_{ip} (V_p - V),$$

- Напряженность электрического поля – в амбиполярном приближении на основе решения для основной плазмы:

$$E = -\frac{\nabla p_e}{en} - 0.71 \frac{\nabla T_e}{e}.$$

- Вероятность ионизации нейтрала:

$$P_{CX}(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{CX}}\right), \quad \frac{1}{\tau_{CX}} = nV\sigma_{CX}(V),$$
$$\sigma_{CX} = \frac{A_1 \ln(A_2/E + A_3)}{1 + A_4 E + A_5 E^{3.5} + A_6 E^{5.4}}.$$

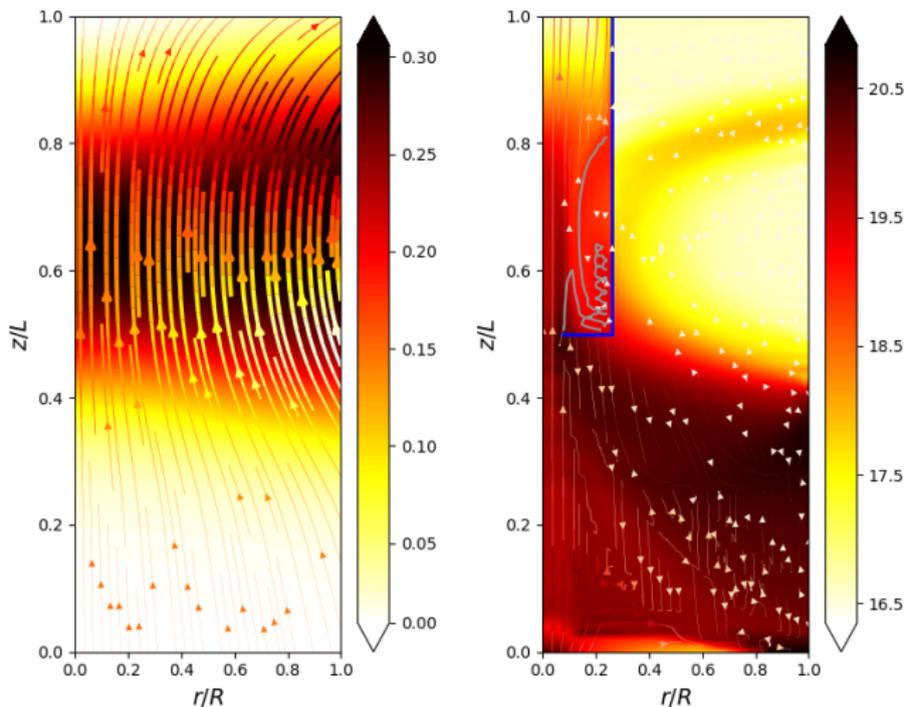
Параметры расчётов I

- Расчёты выполнены в программе, написанной с использованием библиотеки BOUT++ [Dudson et al. CPC 2009].
- Длина и радиус соленоида: $L = 47.5$ см, $R = 3.6$ см.
- Длина и радиус накопительной ячейки: $L_c = L/2 = 23.75$ см, $R_c = 9$ мм.
- Диаметр входного отверстия в накопительной ячейке: $r_c = 5$ мм.
- Параметры ионзатора:
 - ▶ Радиус анодного отверстия: $r_{nozzle} = 2.25$ мм.
 - ▶ Длительность импульса плазмы: $t_p = 200$ мкс.
 - ▶ Скорость истечения плазмы через анодное отверстие:
 $V_0 = 60$ км/с.
 - ▶ Температуры ионов и электронов в сопле: $T_0 = 5$ эВ.
 - ▶ Концентрация плазмы на входе в соленоид: $n_0 = 5 \times 10^{20}$ част./м³.

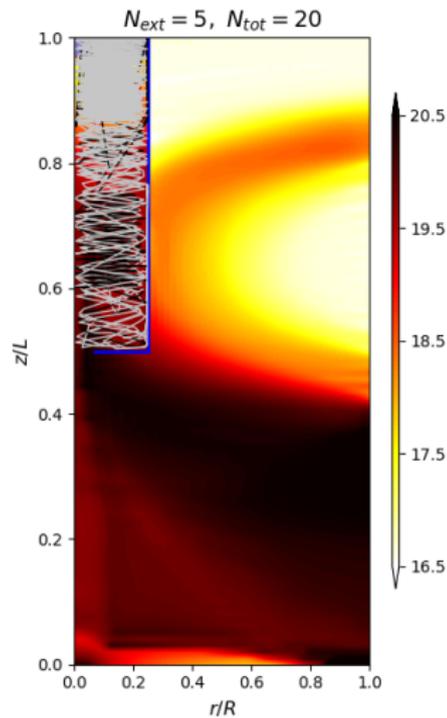
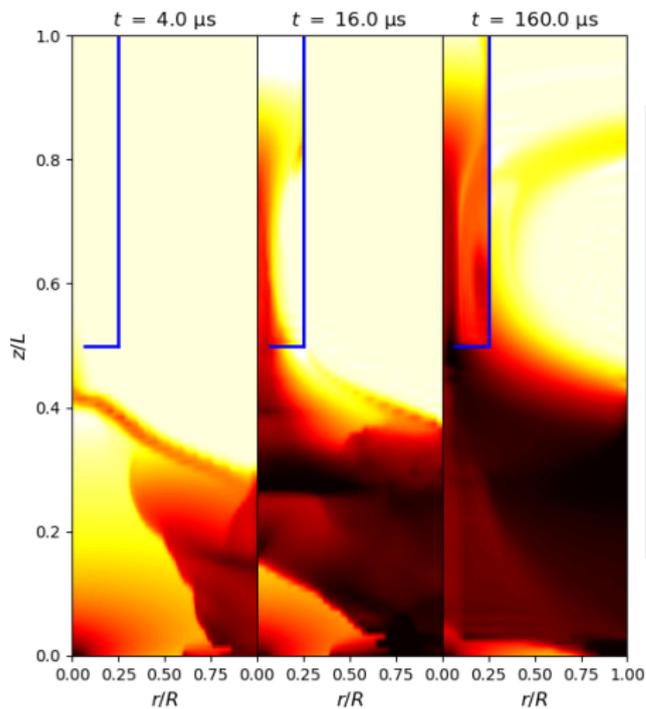
Параметры расчётов II

- Радиус и толщина магнитных катушек: $R_{coil} = 8.85$ см, $H_{coil} = 6,9$ см.
- Число витков и сила тока в катушках:
 - 1 $N_1 = 48, I_1 = -80$ А.
 - 2 $N_2 = 88, I_2 = 350$ А.
 - 3 $N_3 = 88, I_3 = 350$ А.
 - 4 $N_4 = 96, I_4 = -88$ А.
- Температура и давление остаточного газа: $T_g = 300$ К, $p_g = 2 \times 10^{-6}$ мбар.
- Скорость инжектируемых нейтралов: $V_n = 2$ км/с.
- Разрешение расчётной сетки: $N_r \times N_z = 100 \times 100$.

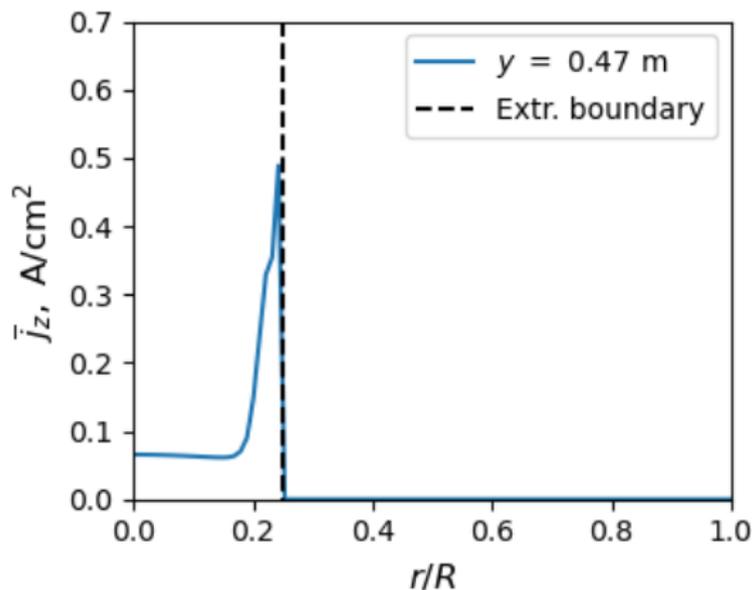
Результаты расчётов динамики плазмы в действующей схеме SPI I



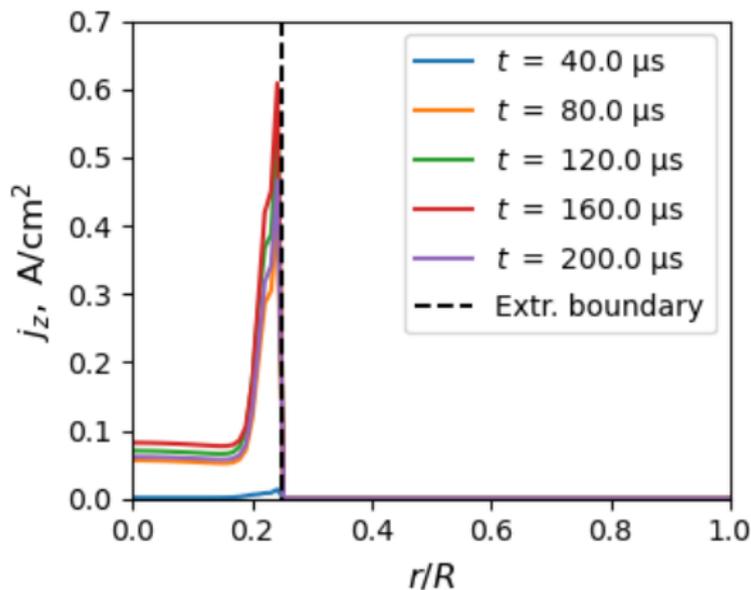
Результаты расчётов динамики поляризованных нейтралов I



Результаты расчётов плотности тока ионов основной плазмы в экстракторе I



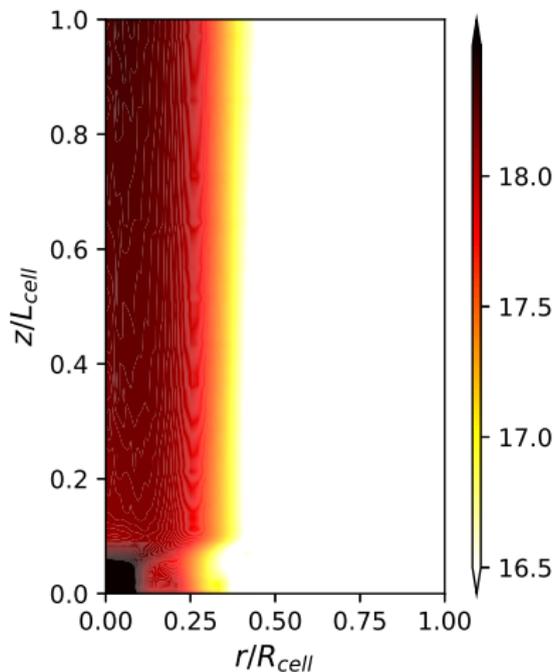
Результаты расчётов плотности тока ионов основной плазмы в экстракторе II



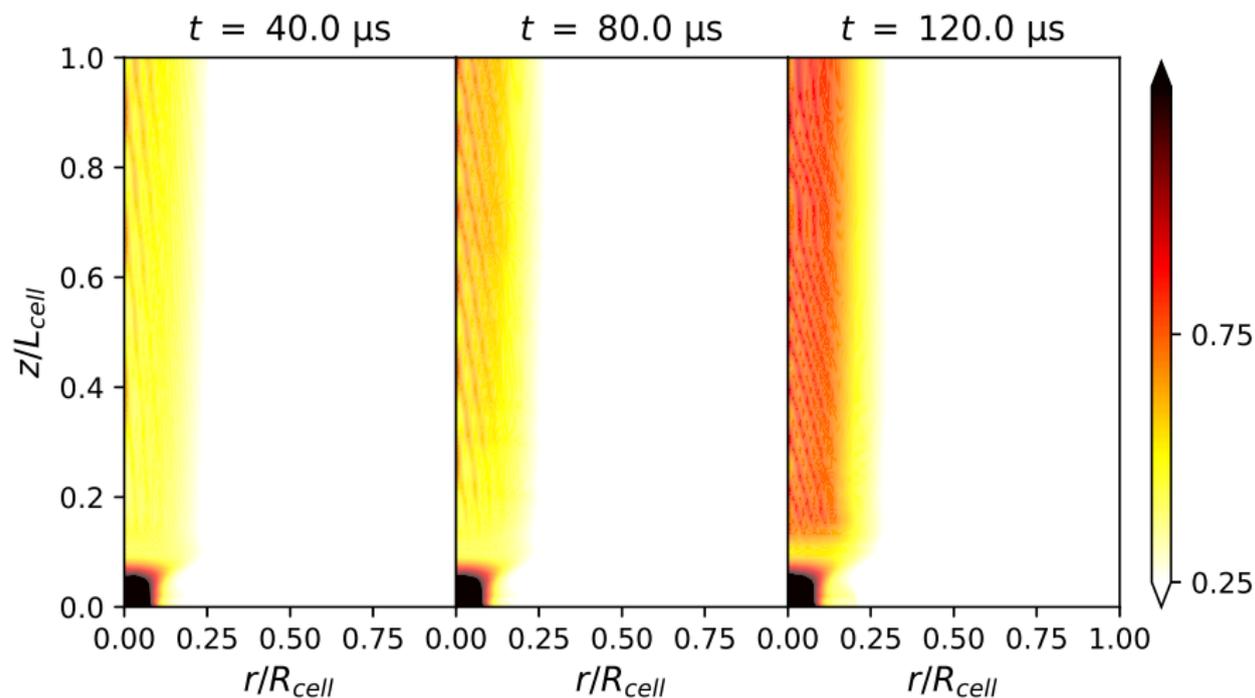
Результаты расчётов динамики плазмы в схеме ИЯФ СО РАН I

- Схема Института ядерной физики СО РАН.
- Магнитное поле прямолинейно, меняется по закону
$$B_z(z) = 6.0 - 2.35[1 + \cos(\pi(z - 5)/5)] \text{ кГс } (z \leq 5 \text{ см}),$$
$$B_z(z) = 1.3 \text{ кГс } (z > 5 \text{ см}).$$
- длина и радиус области движения плазмы $L = 0.5 \text{ м}$, $R = 2 \text{ см}$;
- радиус анодного отверстия $r = 1 \text{ мм}$;
- плотность, температура и скорость истечения плазмы из анодного отверстия $n = 2 \times 10^{19} \text{ част./м}^3$, $T_e = T_i = 5 \text{ эВ}$, $V_z = 38 \text{ км/с}$;
- плотность тока на выходе из плазматрона $j = 12 \text{ А/см}^2$.

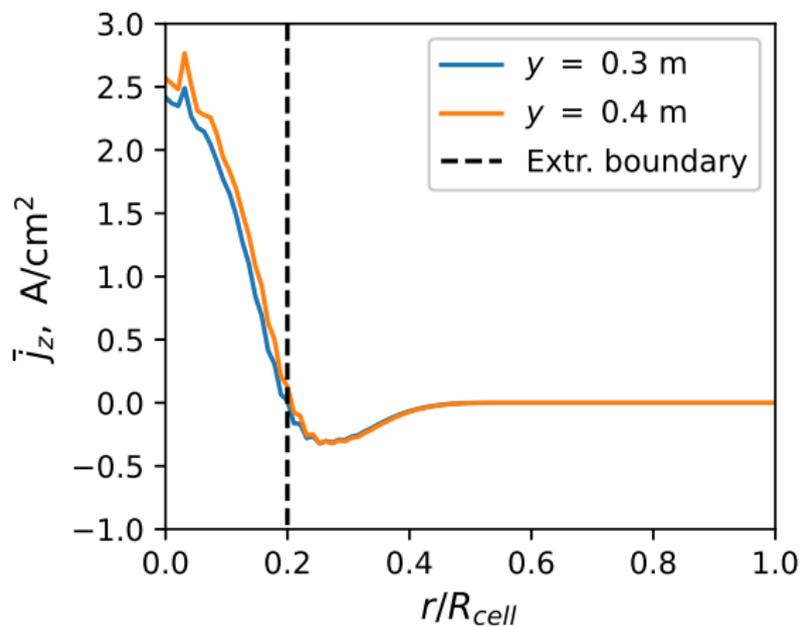
Результаты расчётов динамики плазмы в схеме ИЯФ СО РАН II



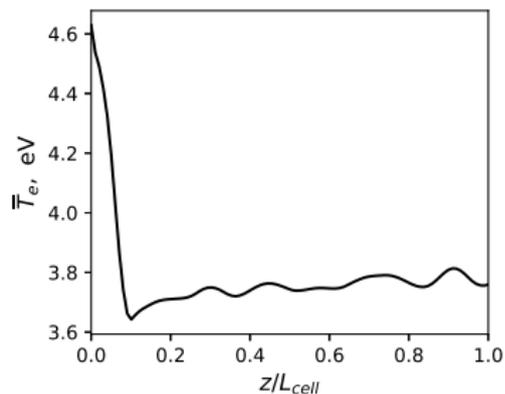
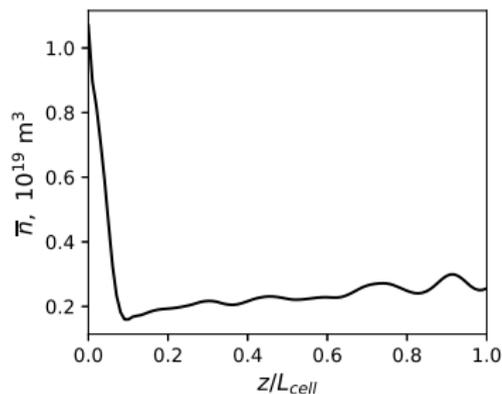
Результаты расчётов динамики плазмы в схеме ИЯФ СО РАН III



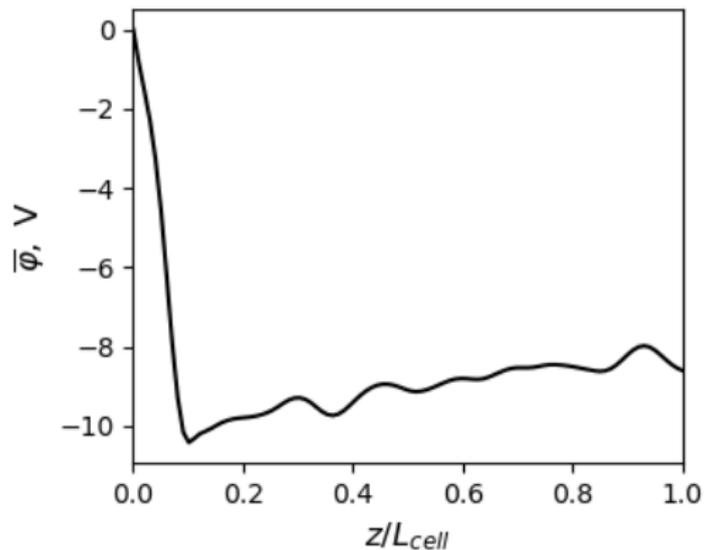
Расчёты профилей параметров потока плазмы I



Расчёты профилей параметров потока плазмы II



Расчёты профилей параметров потока плазмы III



Заключение I

- Построена модель переноса плазмы и поляризованных нейтралов внутри соленоида источника поляризованных нейтралов SPI.
- Подготовлены расчётные коды для моделирования динамики плазмы и нейтралов внутри установки.
- Выполнено моделирование транспорта плазменной струи внутри соленоида SPI с установленной накопительной ячейкой.
- Показано, что наличие области нарастающего магнитного поля приводит к формированию магнитной пробки и сжатию потока плазмы к оси системы.
- Важная особенность прохождения потока плазмы через магнитную пробку – образование конвективной ячейки на входе в магнитное горлышко, связанной с конечной проводимостью данной области установки.

Заключение II

- Наличие физических стенок позволяет дробить конвективные ячейки, уменьшая область перемешивания плазмы. В результате взаимодействия плазменного потока и стенок могут возникнуть условия для установления течения вещества в направлении против потока.
- Вихри негативно влияют на вынос поляризованных частиц из установки, захватывая их внутрь себя.
- Наличие областей установки, заполненных редкой плазмой, нежелательны для организации разряда, поскольку величина объёмного источника поляризованных ионов уменьшается.
- Характер течения плазмы через магнитную пробку внутри накопительной ячейки (образование вихря, формирование области противотечения плазмы за магнитным горлышком) – предполагают, что более эффективной может быть конструкция с прямолинейным магнитным полем либо с накопительной ячейки в форме песочных часов.

Благодарю за внимание!

Магнитное поле катушки

$$\hat{B}_r = M_r^{(0)} x \left[\frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^{3/2}} - \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^{3/2}} \right] +$$
$$M_r^{(1)} x^3 \left[\frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2))^{7/2}} - \frac{1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1))^{7/2}} \right],$$
$$\hat{B}_z = M_z^{(0)} \left[\frac{y_2 - y}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2)^2)^{1/2}} + \frac{y - y_1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1)^2)^{1/2}} \right] +$$
$$M_z^{(1)} x^2 \left[\frac{y_2 - y}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_2)^2)^{3/2}} + \frac{y - y_1}{(x^2 + \alpha + \beta(y - y_1)^2)^{3/2}} \right],$$