

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики
Сафин Роман Русланович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Измерение электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА с
помощью эмиссионных зондов»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20314

Научный руководитель:

аспирант В. О. Устюжанин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. В. В. Максимов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью работы являлось определение радиального распределения электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА. Для этого была собрана измерительная схема с эмиссионным зондом, при помощи которой определялись потенциалы на различном расстоянии от центра плазменного столба. На основании полученных данных был построен радиальный профиль электрического потенциала плазмы и оценены погрешности измерений.

Ключевые слова: электрический потенциал плазмы, эмиссионный зонд, установка СМОЛА.

Содержание

Содержание	3
Введение	4
1. Теоретическая часть	5
1.1 Электрические зонды	5
1.2 Эмиссионный зонд	5
2. Экспериментальная часть	8
2.1 Установка СМОЛА	8
2.2 Эмиссионный зонд	9
2.3 Оценки	10
2.4 Результаты эксперимента	11
3. Вывод	15
4. Список литературы	16
Приложение	17

Введение

Установка СМОЛА создана для экспериментальной проверки концепции винтового удержания, основной задачей которой является управление течением плазменной струи в винтовом магнитном поле. Данная концепция основана на создании движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок, в результате чего возникает сила, с помощью которой можно контролировать плазменные потоки: либо ускорять, либо тормозить их. Для проверки соответствия реального и предполагаемого поведения плазмы необходимо знать полную информацию о её вращении. Одним из необходимых параметров для получения этих данных является радиальный профиль электрического потенциала плазмы. Для исследования поведения данного параметра плазмы используется такая диагностика, как эмиссионный зонд.

Цель исследования – изучить радиальное распределение электрического потенциала плазмы в выходном расширителе установки СМОЛА. Для этого были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработать схему эмиссионного зонда
- 2) Экспериментально получить радиальное распределение электрического потенциала плазмы

1. Теоретическая часть

1.1 Электрические зонды

Для определения потенциала плазмы мы будем использовать метод, основанный на использовании электрических зондов. Электрическим зондом называется металлический электрод небольших размеров, который вводится в исследуемую часть плазмы. Это значит, что способ является контактным и позволяет проводить измерения локально. Сами измерения заключаются в регистрации зондового тока в зависимости от величины приложенного напряжения, т.е. определении зондовой вольтамперной характеристики (ВАХ).

Установка СМОЛА создана для экспериментальной проверки концепции винтового удержания, основной задачей которой является управление течением плазменной струи в винтовом магнитном поле. Данная концепция основана на создании движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок. В результате чего возникает сила, с помощью которой можно контролировать плазменные потоки: либо ускорять, либо тормозить их. Для проверки соответствия реального и предполагаемого поведения плазмы необходимо знать полную информацию о её вращении. Одним из необходимых параметров для получения этих данных является радиальный профиль электрического потенциала плазмы. Для исследования поведения данного параметра плазмы используется такая диагностика, как эмиссионный зонд.

1.2 Эмиссионный зонд

Для Максвелловских функций распределения по скоростям ионов и электронов V_{fl} и Φ_{pl} пропорциональны друг другу через соотношение

$$\Phi_{pl} = V_{fl} + \ln \ln \left(\frac{|I_{es}|}{|I_{is}|} \right) \frac{T_e}{e}, \quad (1)$$

где T_e – электронная температура; I_{es} , I_{is} – электронный и ионный токи насыщения, соответственно; e – заряд электрона. Токи насыщения и электронную температуру можно определить из ВАХ зонда. Однако из-за

временных или пространственных вариаций T_e вычисление $\Phi_{pl}(V_{fl})$ может стать очень сложным или даже невозможным. Также эффективные площади зонда для сбора электронов и ионов, соответственно, которые содержатся в I_{es} , могут отличаться друг от друга, в частности, в намагниченной плазме. Кроме того, более сильные отклонения электронной функции распределения скоростей от Максвелловского (например, из-за дрейфа электронов или пучка) искажают ВАХ холодного зонда, вызывая его сдвиг в отрицательную сторону из-за кинетической энергии электронов (рис. 1). [1]

V_{fl} имеет отрицательное значение, потому что в единицу времени на поверхность зонда поступают одинаковые количества ионов и электронов, однако плотности носителей заряда, отвечающие этим двум типам заряженных частиц, равны по величине лишь вне слоя. Поэтому первоначально на поверхность зонда поступает в единицу времени больше электронов, чем ионов, и на ней накапливается отрицательный заряд, этот отрицательный заряд отталкивает электроны и ускоряет ионы. Таким образом, перед зондом образуется слой пространственного положительного заряда, который увеличивается до тех пор, пока не установится динамическое равновесия между токами, вызванными этими двумя сортами носителей заряда I_+ и I_e , и результирующий ток I_p не обратится в нуль. Начиная с этого момент зонд находится под плавающим потенциалом, V_{fl} , отрицательным по отношению к границе слоя, т.е. к невозмущённой плазме. Размер этого слоя сравним с радиусом Дебая и может быть найден по формуле (2):

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n e^2}} \quad (2)$$

где $k = 1.38 * 10^{-23} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2} \text{ К}^{-1} \text{ кг}$, e - заряд электрона. В нашем случае $T = 5 \div 10 \text{ эВ}$, $n = 1 \div 5 * 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а по формуле (2) $\lambda_D = 7 \div 23 \text{ мкм}$.

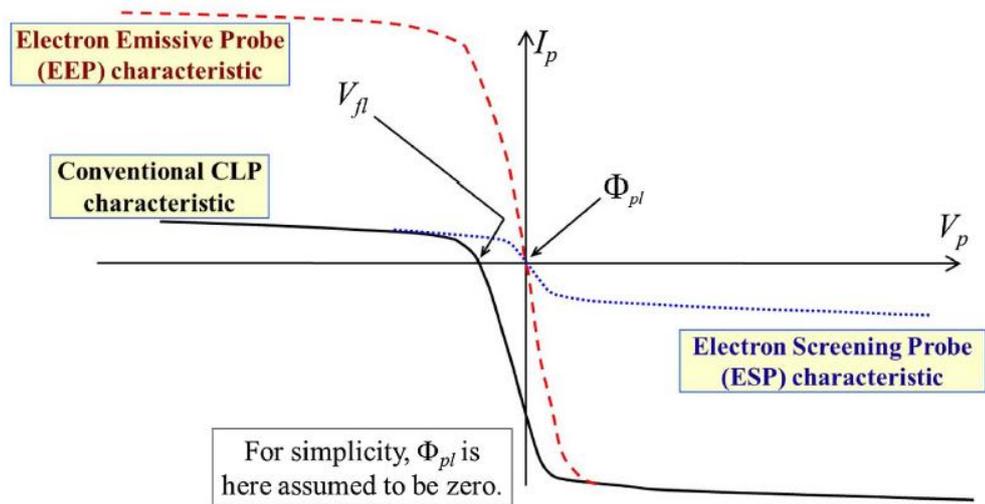


Рис. 1. ВАХ различных типов зондов [2]

Проблемы, которые были описаны выше, такие, как вычисление Φ_{pl} , изменение эффективных площадей зонда, искажение ВАХ зонда, могут быть частично или полностью решены заменой холодного зонда на эмиссионный (испускающий электроны в плазму). Нагрев зонда до температуры эмиссии может производиться при помощи дополнительной электрической цепи, подключенной к зонду, либо же происходить в результате непосредственного контакта зонда с высокотемпературной плазмой (однако в этом случае необходимо убедиться, что зонд успевает нагреться за время пребывания в плазме).

Для эмиссионного зонда формула (1) принимает следующий вид [1]:

$$\ln\left(\frac{|I_{es}|}{|I_{is} + I_{ep}|}\right) = \frac{(\Phi_{pl} - V_{fl})e}{T_e}, \quad (3)$$

где I_{ep} – электронный ток эмиссии с поверхности зонда (также определяется из ВАХ зонда).

2. Экспериментальная часть

2.1 Установка СМОЛА

Экспериментальные измерения проводились на установке СМОЛА, разработанной для изучения течения плазмы в скрещенных винтовом магнитном и радиальном электрическом полях. Установка состоит из 4 основных частей: источника плазмы, транспортной секции с многопробочной винтовой магнитной конфигурацией и двух концевых баков расширителей плазменного потока (Рис.2) [3].

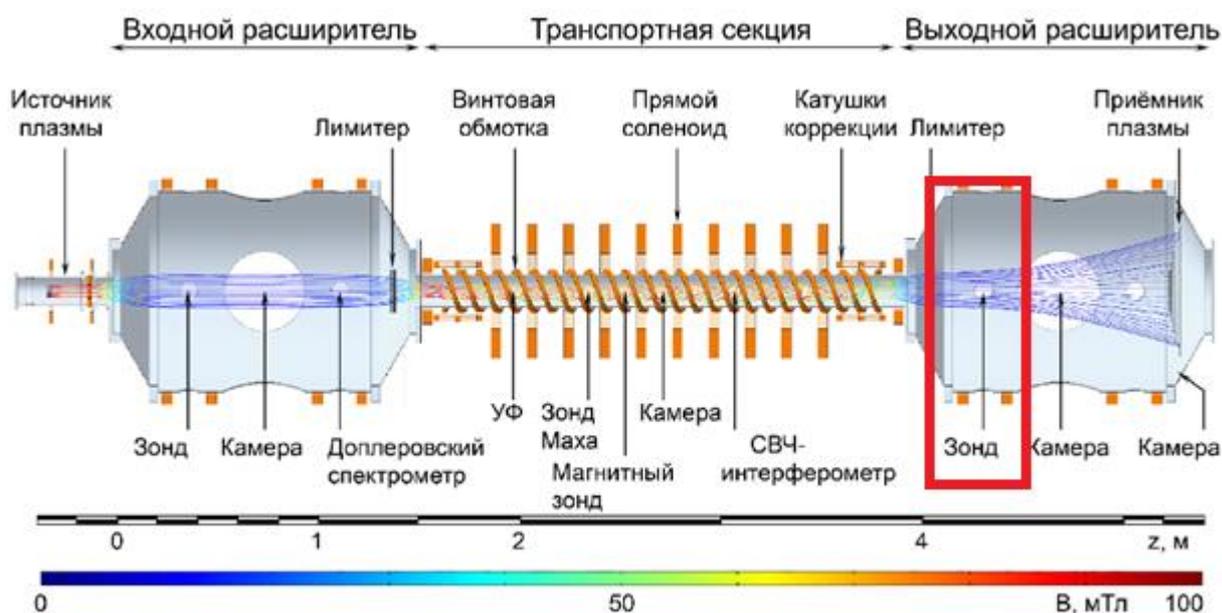


Рис. 2. Установка СМОЛА. Расположение зонда в эксперименте выделено красным прямоугольником

Плазменный поток создаётся источником плазмы за счёт магнетронного разряда. Источник плазмы представляет из себя аксиально – симметричную систему с горячим LaV_6 катодом, кольцевым медным анодом, двумя магнитными катушками и вакуумной камерой 48 см в длину и 14 см в диаметре. Данный источник генерирует плазменный поток со следующими параметрами: плотность $n = 1 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, температура $T_i = 1 \div 5 \text{ эВ}$ и $T_e = 10 \div 40 \text{ эВ}$. Радиус плазмы варьируется в диапазоне $R = 7 \div 10 \text{ см}$ [4].

Эмиссионный зонд для данного исследования был помещён в зону выходного расширителя на расстоянии 434 см до катода.

2.2 Эмиссионный зонд

Принципиально эмиссионный зонд представляет собой металлический электрод, который измеряет электрический потенциал плазмы в конкретной области плазменного шнура. В качестве материала обычно используется вольфрам, тантал, молибден или торированный вольфрам (с добавкой диоксида тория). В данном случае было решено использовать торированный вольфрам в качестве материала зонда, в связи с тем, что данный материал имеет более низкую работу выхода электронов, чем вольфрам (2.6 эВ по сравнению с 4.5 эВ у вольфрама). После того, как был выбран материал, зонд был помещён в изолирующую керамическую трубку (рис. 3)

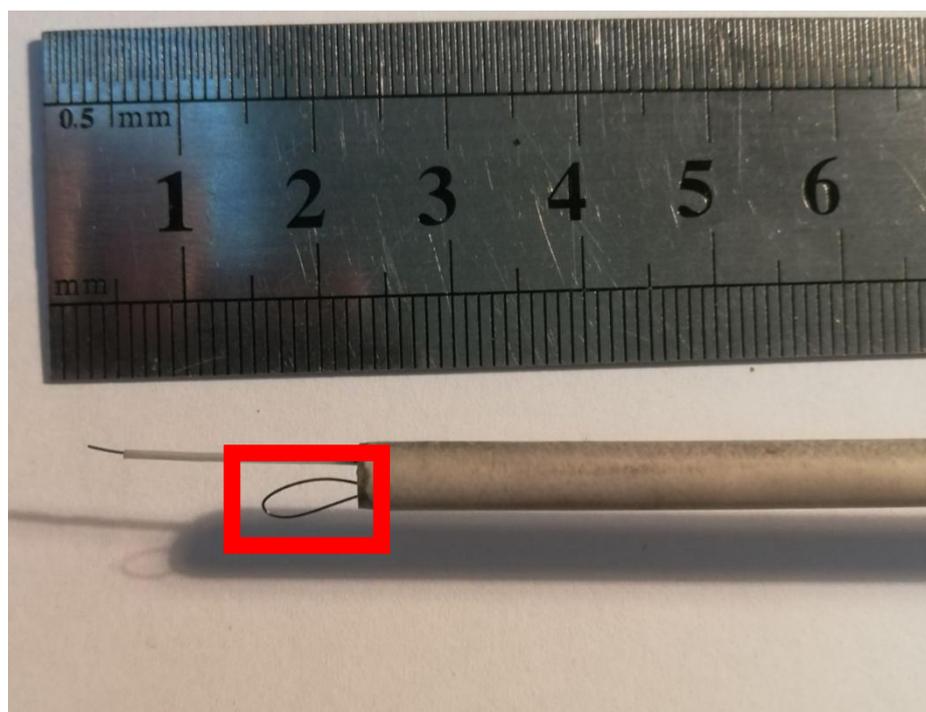


Рис. 3. Эмиссионный зонд

Одним из важных вопросов является вопрос нагрева зонда до температуры термоэлектронной эмиссии. В данном случае параметры плазмы в выходном расширителе таковы, что зонд не успевает прогреваться за время одного выстрела до рабочего режима. В связи с этим было необходимо реализовать систему дополнительного нагрева зонда (рис. 4).

Схема состоит из источника постоянного напряжения на 48 В, конденсатора ёмкостью 22 мФ, регулирующего IGBT ключа, 2 резисторов с сопротивлениями 5.1 кОм. Также в схему встроен диод, чтобы не пропускать ток, собираемый зондом со стороны плазмы.

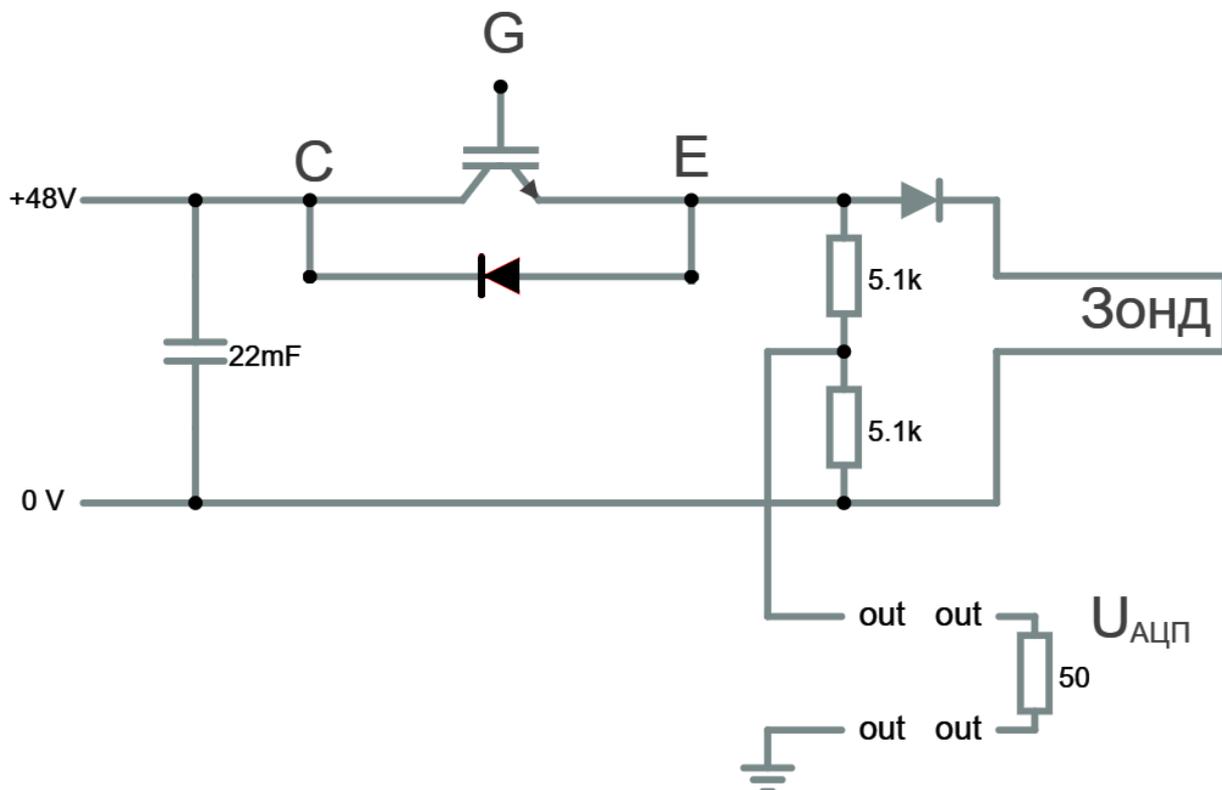


Рис. 4. Схема дополнительного нагрева

2.3 Оценки

Оценим силу тока, которую надо подать для нагрева зонда по формуле (4), при следующих параметрах: $T = 2000$ К, радиус проволоки $a = 0,15$ мм, длина $l = 30$ мм, материал – торированный вольфрам [5]:

$$I = \left\{ \frac{2\pi a^3}{\rho} [\sigma \varepsilon (T_w^4 - T_{amb}^4) + \phi A T^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right)] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

где $\varepsilon = 0.4$, $\phi = 2.6$ eV, $A = 3 \frac{\text{А}}{\text{см}^2\text{К}^2}$, $\rho = 50 * 10^8$ Ом * м, $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$, e – заряд электрона

Так же оценим мощность излучения, испускаемого нагретым зондом по формуле (5), необходимое количество теплоты для нагрева эмиссионного зонда (6) и количество энергии, которую конденсатор может запасти (7),

$$W = 2\pi a l \sigma \varepsilon T^4 \quad (5)$$

$$Q = c * m * \Delta T \quad (6)$$

$$A = \frac{c * U^2}{2} \quad (7)$$

где $c = 174 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$, $m = 4 \text{ мкг}$, $C = 22 \text{ мФ}$, $U = 48 \text{ В}$.

Полученная сила тока составила $I = 3.6 \text{ А}$, мощность $W = 1.2 \text{ Вт}$, энергия для нагрева $Q = 11 \text{ Дж}$, энергия, запасённая конденсатором $A = 25 \text{ Дж}$. Исходя из наших оценок, после нагрева зонда до нужных нам температур, зонд не успеет быстро остыть и параметров нашей нагревательной системы достаточно для нагрева зонда до нужного состояния.

2.4 Результаты эксперимента

В ходе двух экспериментальных серий с разным режимом нагрева эмиссионного зонда удалось получить радиальные профили электрического потенциала плазмы в выходном расширителе (рис. 2). Значения потенциала плазмы измерялись путём перемещения зонда по радиусу плазменного шнура от периферии к центру с шагом 8 мм. В первой серии нагрев зонда осуществлялся до зажигания плазменного разряда в течении 50 мс. Это то время, за которое конденсатор отдаёт большую часть своей энергии (рис. 5). Во второй серии нагрев зонда осуществлялся во время горения разряда.

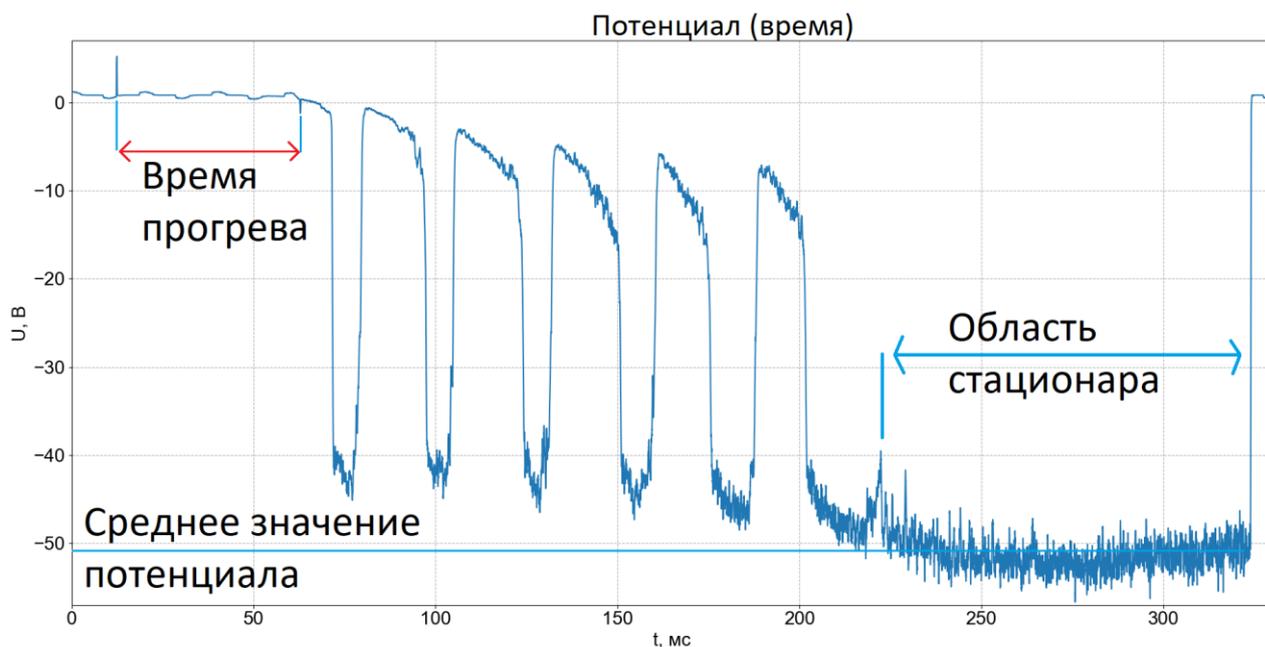


Рис. 5. Значение плавающего потенциала от времени

Далее путём усреднения значений потенциала в каждом отдельном измерении в области стационара высчитывалась погрешность измерений. В итоге были получены профили радиального распределения потенциала (рис. 6), при этом по полученным результатам погрешность измерения становится больше по мере приближения зонда к центру плазменного шнура (оси установки), что может быть связано с неустойчивым течением разряда (колебаниями потенциала в течении каждого экспериментального выстрела (рис. 5)).

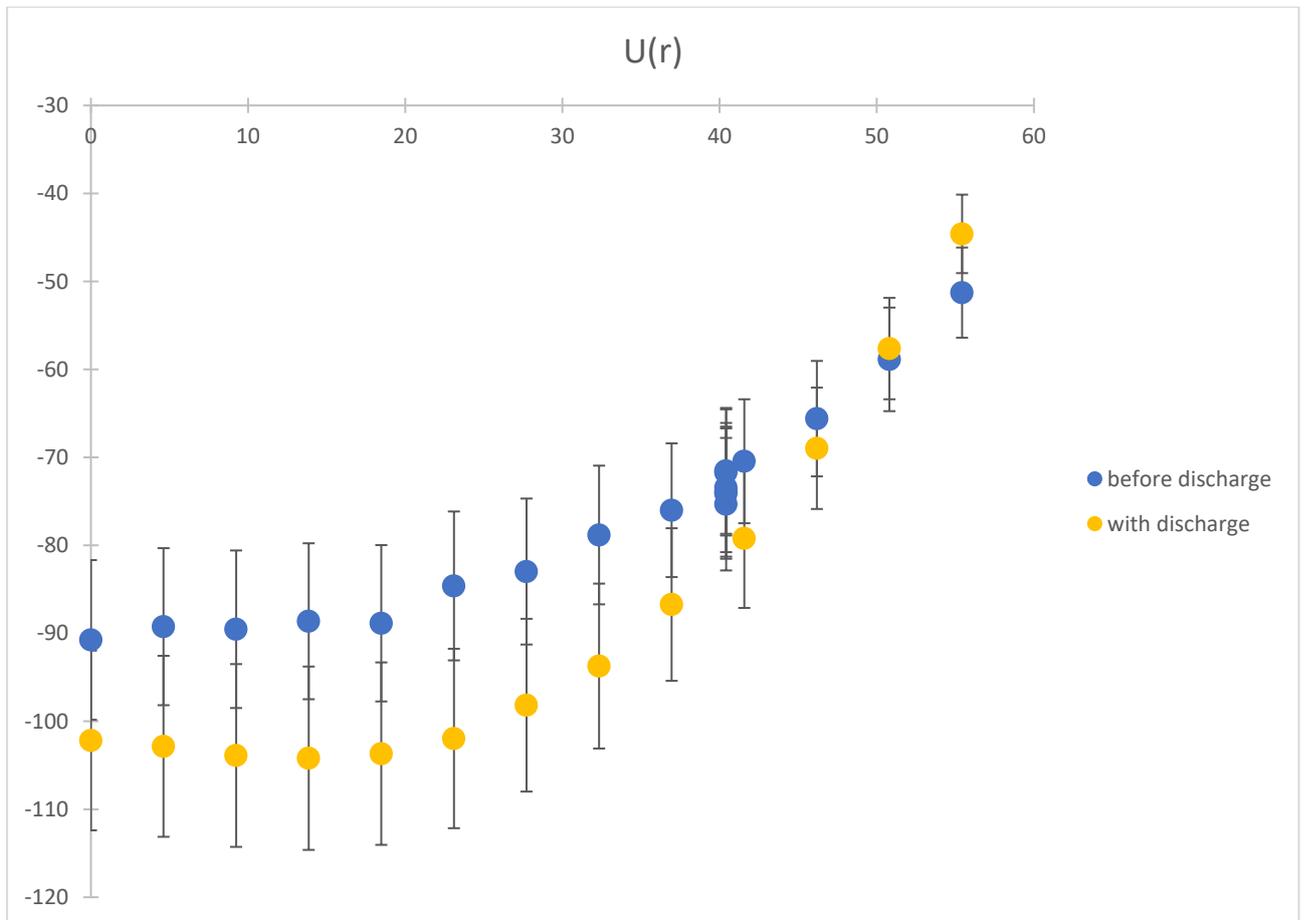


Рис. 6. Радиальный профиль потенциала плазмы в двух экспериментальных сериях

По графикам наблюдается различие между профилем потенциала, когда зонд нагревался до зажигания разряда и во время горения разряда. Но поскольку отличие результатов в разных сериях лежит в масштабе погрешностей измерений, считаем, что зонд в обеих сериях работает в нужном для нас режиме термоэмиссии. В дальнейшем требуется повторить эксперимент для проверки полученных данных.

По полученным измерениям мы можем утверждать, что в выходном расширителе электрический потенциал плазмы качественно имеет то же радиальное распределение, что и во входном расширителе ($z = 40$ см) (рис. 7). Причём измерения потенциала во входном расширителе и в транспортной секции производились самонагревающимися зондами. При этом отличие формы профиля в выходном расширителе от радиального распределения во входном расширителе может свидетельствовать о влиянии потенциалов на плазموприёмниках и лимитере на выходе из центральной секции.

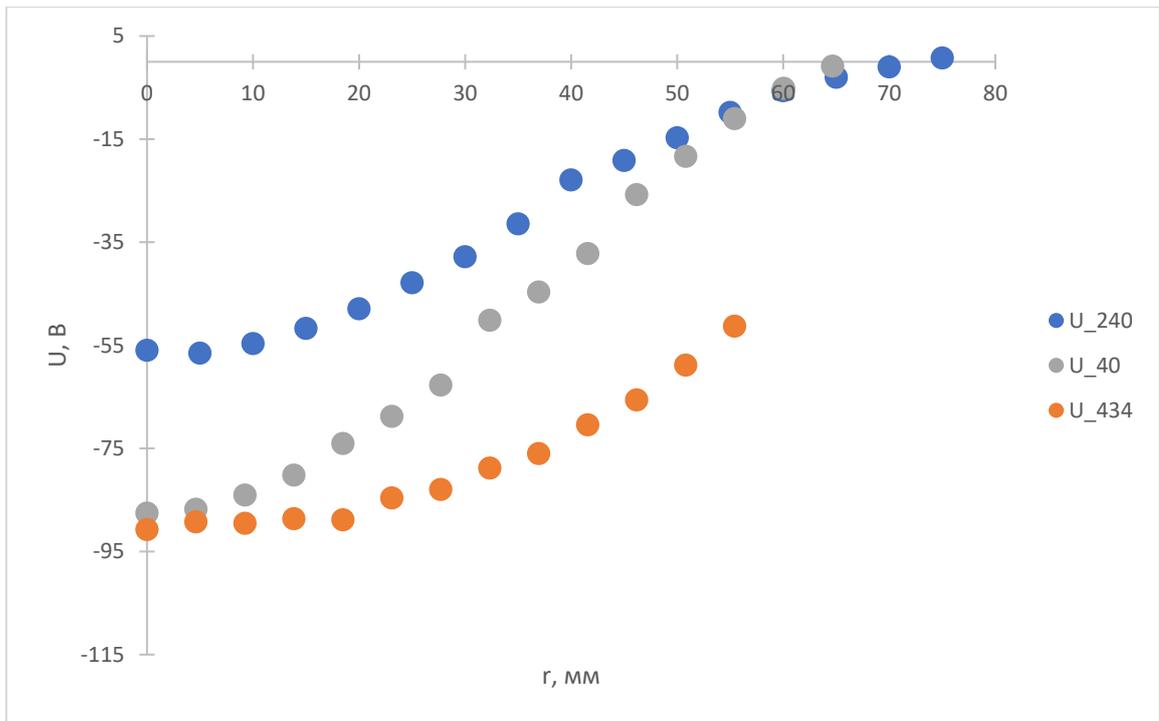


Рис. 7. Радиальное распределение потенциала во входном расширителе, в транспортной секции и в выходном расширителе

3. Вывод

В результате проделанной работы, была реализована схема эмиссионного зонда с дополнительным нагревом для измерения электрического потенциала плазмы в выходном расширителе. Полученные данным зондом результаты коррелируют с результатами других эмиссионных зондов в установке СМОЛА. На основе полученных данных мы можем утверждать, что данный вариант эмиссионного зонда можно использовать для исследования радиального распределения электрического поля в выходном расширителе для исследования вращения плазмы.

4. Список литературы

- 1 – R. Schrittwieser, C. Ioniță, P.C. Balan et al. *Emissive Probes, Principles and Recent Developments*. (2004)
- 2 - Ionita, C., Schneider, B.S., Costea, S. *et al.* Plasma potential probes for hot plasmas. *Eur. Phys. J. D* **73**, 73 (2019).
- 3 – Sudnikov, A. V. et al. *SMOLA device for helical mirror concept exploration*. *Fusion Engineering and Design*, **122**, 86-93 (2017).
- 4 – Ivanov, I. A., Ustyuzhanin, V. O., Sudnikov, A. V., & Inzhevatkina, A. (Accepted/In press). *Long-pulse plasma source for SMOLA helical mirror*. *Journal of Plasma Physics*, [845870201] (2021).
- 5 - J. P. Sheehan, Yevgeny Raitses et al. *Recommended Practice for Use of Emissive Probes in Electric Propulsion Testing*. *JOURNAL OF PROPULSION AND POWER*, 537-792 (2017)

Приложение



Рис. 8 Зонд