

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бочкарев Вячеслав Васильевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение потенциалов плазмы в установке СМОЛА эмиссионным
зондом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19308

Научный руководитель:

аспирант, В.О. Устюжанин

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось определение радиального распределения электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА. Для этого была собрана измерительная цепь с эмиссионным зондом, при помощи которого определялись потенциалы на различном расстоянии от центра плазменного столба. Была доказана правомерность использования эмиссионного зонда в данном эксперименте. На основании полученных данных был построен радиальный профиль электрического потенциала плазмы и оценены погрешности измерений. Полученное распределение согласуется с результатами других диагностик, а также позволяет судить о вращении плазмы в установке.

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

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть	5
3. Экспериментальная установка.....	7
3.1. Измерительная схема.....	7
3.2. Оценка времени нагрева проволоочки	8
3.3. Калибровка измерительной системы.....	9
4. Результаты эксперимента	10
5. Обработка данных	11
6. Заключение.....	12
7. Список литературы.....	13

1. Введение

Ключевой неразрешенной проблемой удержания плазмы в открытых магнитных ловушках остаётся вопрос сокращения продольных потерь частиц и энергии, являющихся причиной малого времени удержания плазмы. Одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является концепция винтового удержания, которая основана на формировании движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок. Принцип образования магнитных пробок заключается в создании определённой конфигурации радиального электрического и винтового магнитного полей, которые и задают необходимое вращение плазмы.

Для экспериментального подтверждения эффективности данной концепции в 2017 году в Институте Ядерной Физики имени Г.И. Будкера была запущена установка СМОЛА (спиральная магнитная открытая ловушка). 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.

Целью данной курсовой работы является определение радиального распределения электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА.

Для достижения поставленной цели были выдвинуты следующие задачи:

1. Собрать схему для измерения необходимых параметров плазмы и откалибровать её;
2. Провести экспериментальные измерения в установке;
3. На основе полученных данных рассчитать радиальное распределение потенциала плазмы в установке СМОЛА.

2. Теоретическая часть

Существуют разные способы определения электрического потенциала плазмы, однако наиболее простым из них является метод, основанный на применении электрических зондов.

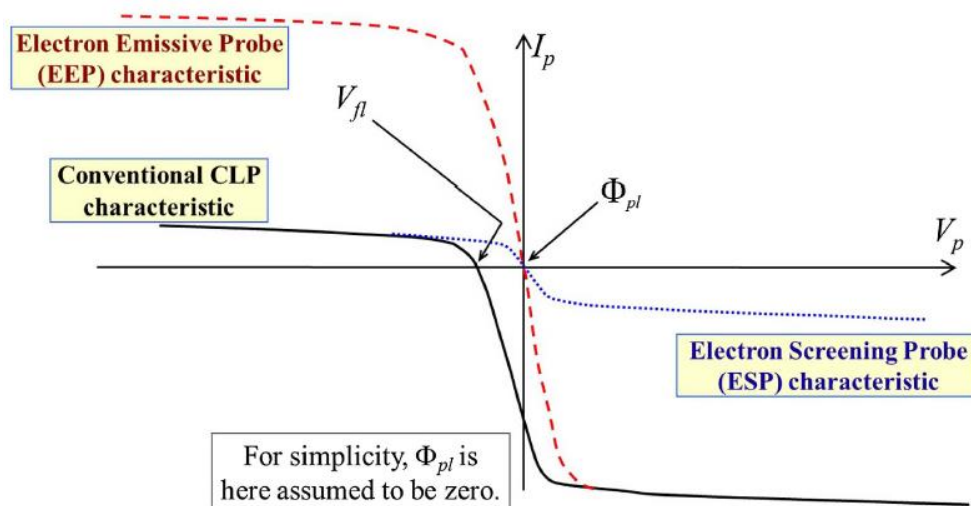


Рис. 1 ВАХ различных типов зондов [2]

Согласно теории зондовых измерений для определения потенциала плазмы Φ_{pl} достаточно знать плавающий потенциал зонда V_{fl} (потенциал зонда, при котором суммарный ток, протекающий через него, равен нулю), электронную температуру, электронный и ионный токи насыщения, так как эти величины, в предположении максвелловского распределения электронов по энергиям, связаны следующей формулой [1]:

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

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 [2] (рис. 1).

Эта формула используется для расчета потенциала плазмы при измерении обычным (так называемым «холодным») зондом, однако её применимость в некоторых случаях требует отдельного исследования, так как из-за временной или пространственной неоднородности T_e , вычисление Φ_{pl} может сильно усложниться или же вовсе стать невозможным. Помимо этого, необходимо учитывать тот факт, что в сильно замагниченной плазме эффективные площади сбора зондом ионов и электронов из плазмы могут сильно различаться, что напрямую повлияет на определение I_{is} и I_{es} .

Эти проблемы 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]:

$$\ln\left(\frac{|I_{es}|}{|I_{is} + I_{ep}|}\right) = \frac{(\Phi_{pl} - V_{fl})e}{T_e}, \quad (2)$$

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

3. Экспериментальная установка

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).

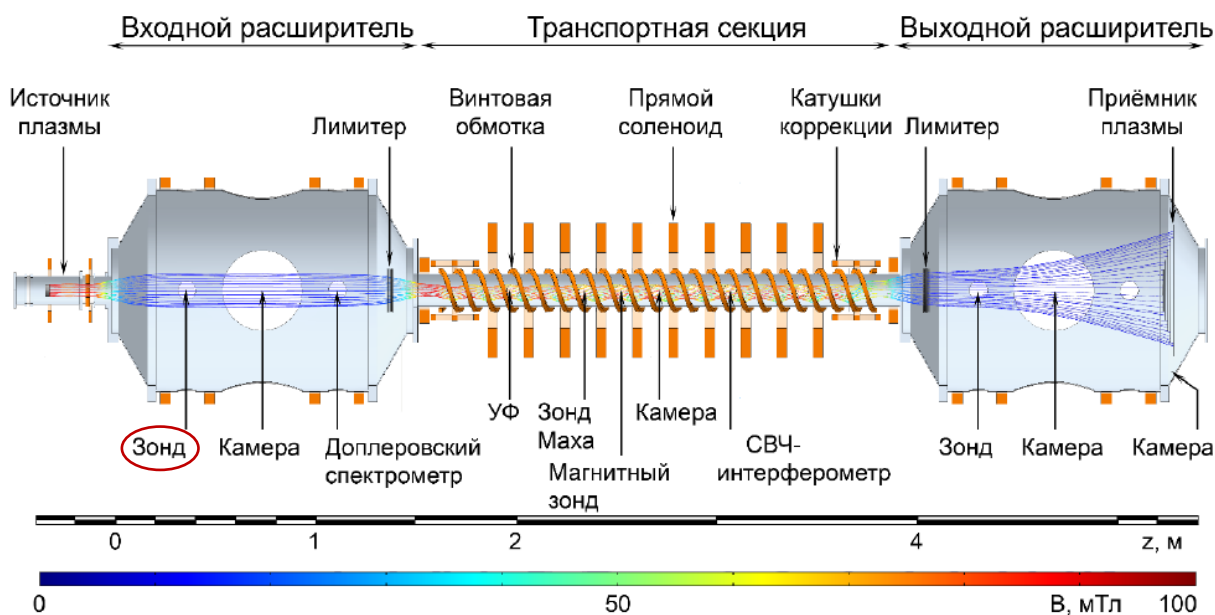


Рис. 2 Установка СМОЛА. Расположение зонда в эксперименте выделено красным

3.1. Измерительная схема

Для проведения эксперимента была собрана измерительная схема, состоящая из эмиссионного зонда, подключенного к АЦП через дифференциальный пробник с возможностью изменения коэффициента передачи напряжения (Можно устанавливать значение коэффициента передачи 1:10 либо 1:100) (рис. 3). На АЦП измерялась разность потенциалов между зондом и землей (корпусом установки).

В данном эксперименте было решено использовать эмиссионный зонд с проволокой из торированного вольфрама, так как этот материал обладает меньшей по сравнению с чистым вольфрамом работой выхода (W

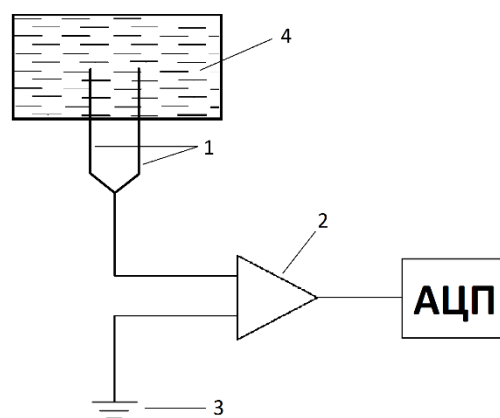


Рис. 3 Схема измерительной цепи, 1 - эмиссионный зонд, 2 - дифференциальный пробник, 3 - земля (корпус установки), 4 - плазма

= 2,6 эВ против 4 эВ, соответственно) [3], следовательно, необходимый эмиссионный ток может быть получен при меньшей температуре ($T \sim 1800$ К для торированного вольфрама) [3]. Таким образом, меньшая работа выхода позволяет отказаться от использования дополнительной электрической цепи, нагревающей зонд, так как энергии потока частиц плазмы становится достаточно, чтобы за время одного эксперимента ($t \sim 150$ мс.) нагреть зонд до необходимой температуры. При этом зонд помещается в керамическую изоляцию (Al_2O_3).

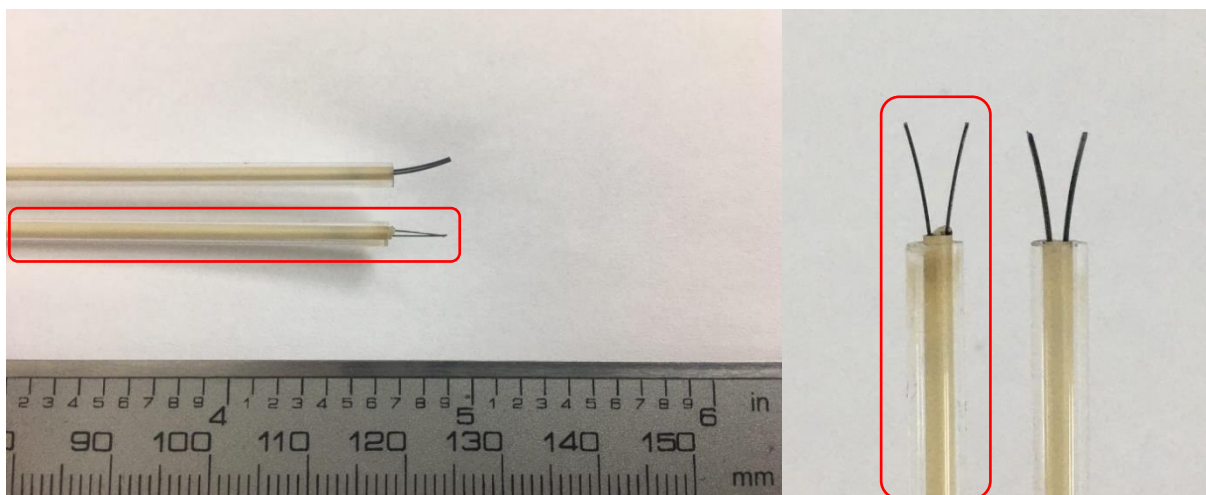


Рис. 4 Эмиссионные зонды. Зонд с торированным вольфрамом выделен красным, второй зонд использовался для определения электронной температуры

Эмиссионный зонд устанавливался во входном расширителе (40 см от источника плазмы), при помощи специального устройства (рис. 5), посредством которого можно было определять положение зонда относительно оси установки (и соответственно относительно центра плазменного столба).

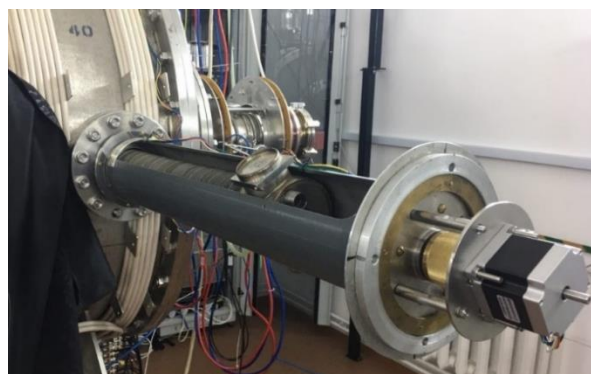


Рис. 5 Держатель зонда

3.2. Оценка времени нагрева зонда

Для оценки времени нагрева воспользуемся следующей формулой:

$$\tau \approx \frac{\Delta T \cdot C}{W \cdot S} \quad (3)$$

где τ – время нагрева проволоочки зонда, ΔT – разница между начальной и необходимой температурами зонда (~ 1500 К), C – теплоемкость участка

проволочки при 1800 °С, W - интенсивность потока частиц плазмы, S – площадь участка проволочки, контактирующего с плазмой (диаметр проволочки $d = 0,15$ мм; длина участка проволочки $l = 5$ мм).

Интенсивность потока частиц плазмы можно оценить следующим образом:

$$W \approx j_e T_e \approx \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \cdot \frac{J_{\text{иона}}}{S} T_e, \quad (4)$$

где j_e – плотность тока электронов в плазме, T_e - электронная температура, m_i – масса ионов плазмы, m_e – масса электрона, $J_{\text{иона}}$ – ионный ток насыщения для участка проволочки. В эксперименте использовалась водородная плазма, поэтому отношение $m_i/m_e \cong 1836$.

В результате оценки получаем, что поток плазмы нагревает зонд до температуры эмиссии за время $\tau \cong 50$ мс, что подтверждает правомерность использования выбранного материала зонда для проведения эксперимента.

3.3. Калибровка измерительной системы

Непосредственно перед экспериментом была проведена калибровка всего измерительного оборудования. Для начала сравнили амплитуду подаваемого на дифференциальный пробник и АЦП синусоидального сигнала, с амплитудой сигнала, выдаваемого с АЦП на компьютер.

С генератора АКПП – 3402 подавался синусоидальный сигнал амплитудой 10 В, в то время как амплитуда сигнала, получаемого на АЦП равнялась $U_A = 0,483$ В (рис. 6). Из этих данных был рассчитан калибровочный коэффициент $\kappa_1 = 20,7$.

После проверки выходного сигнала на АЦП, проверили наличие падения напряжения на корпусе держателя зонда (рис. 5). Измерения падения напряжения осуществлялись с помощью осциллографа АКПП – 4113/6. Второй коэффициент $\kappa_2 = 1,445$.

В результате получили итоговый калибровочный коэффициент $K = \kappa_1 * \kappa_2 = 29,91$, показывающий во сколько раз напряжение на зонде больше значения, получаемого на АЦП.

Во время эксперимента на дифференциальном пробнике было установлено значение коэффициента передачи 1:10.

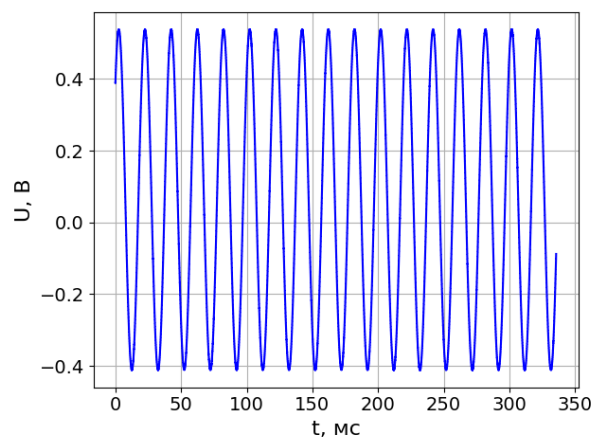


Рис. 6 Сигнал от генератора на АЦП

4. Результаты эксперимента

В результате измерений были получены значения плавающего потенциала зонда при различных расстояниях от центра плазменного столба (рис. 7).

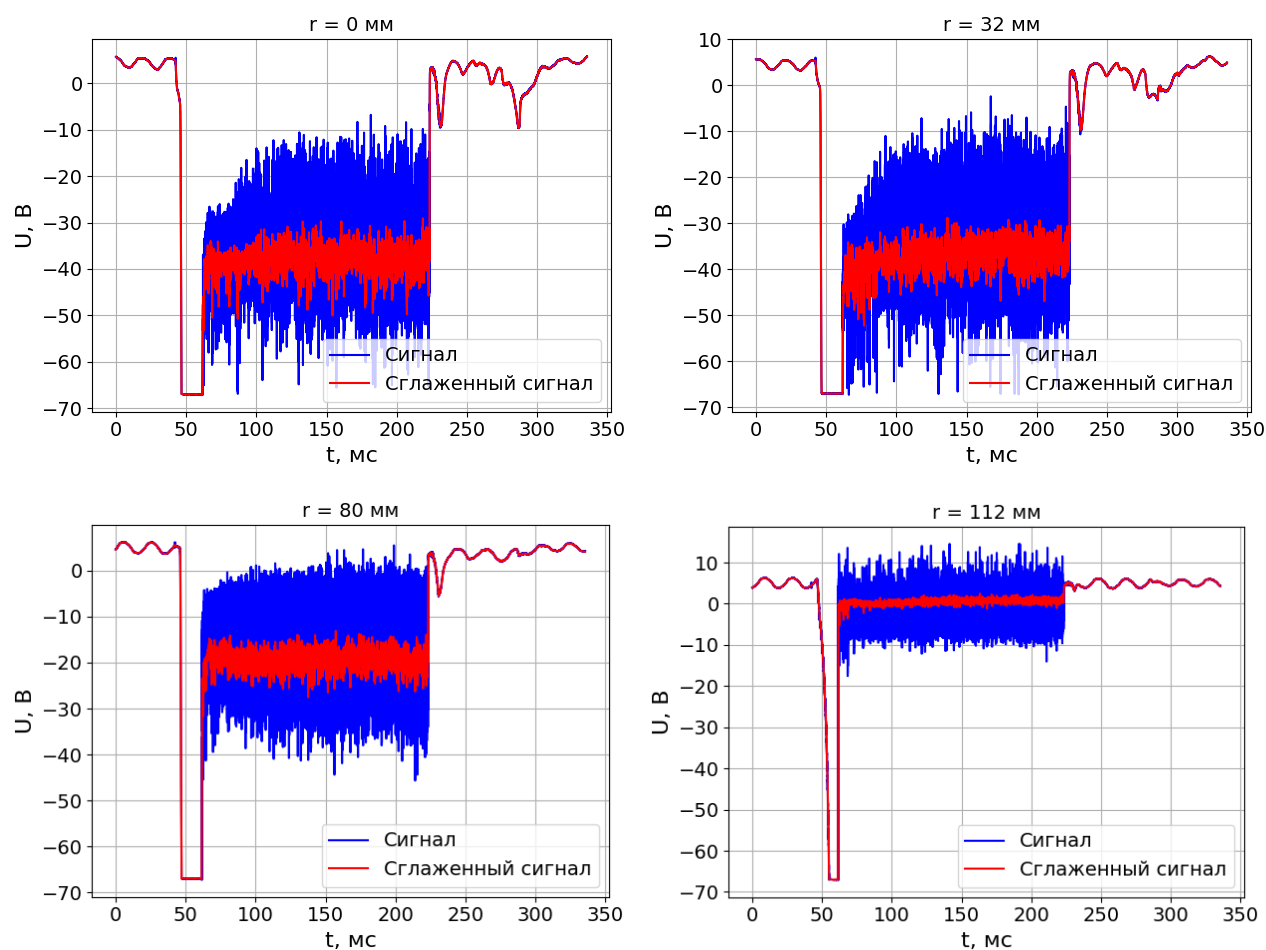


Рис. 7 Измерения плавающего потенциала зонда при различных расстояниях от центра плазмы.

Значения плавающего потенциала были извлечены из сигнала, сглаженного методом Савицкого – Голея. Основной тип шума в сигнале - дробовой.

В полученных измерениях можно наблюдать увеличение падения плавающего потенциала по мере приближения зонда к центру плазмы. При этом во всех сигналах перед зажиганием разряда наблюдается резкое падение потенциала до $U \approx -70$ В. Это вызвано тем, что для зажигания разряда и генерации плазмы на катод подаётся отрицательный потенциал $U = -(250 \div 300)$ В. Однако для зонда невозможно ступенчатое изменение потенциала, следовательно, при дальнейших измерениях, необходимо увеличить коэффициент передачи на дифференциальном пробнике.

5. Обработка данных

В результате эксперимента был получен радиальный профиль плавающего потенциала (рис. 8). Потенциал плазмы на половину электронной температуры меньше плавающего потенциала зонда, поэтому для нахождения потенциала плазмы нужно из полученных значений вычесть половину электронной температуры из каждого измерения, нормированную на заряд электрона. Электронная температура в каждой точке измерялась с помощью двойного зонда (таблица).

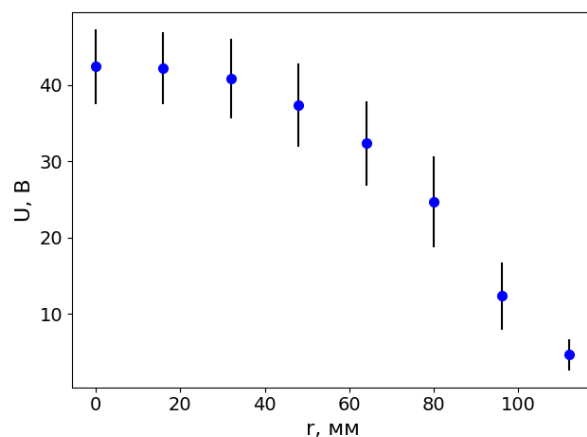


Рис. 8 Радиальное распределение плавающего потенциала зонда; результаты эксперимента, с усамы погрешностей

Таблица. Значения плавающего потенциала U и электронной температуры T_e при различном положении зонда относительно центра установки r

r , мм	T_e , эВ	U , В
112	7,2	4,6
96	8,4	12,3
80	17,6	24,7
64	20,8	32,3
48	19,8	37,4
32	20,3	40,8
16	22,4	42,2
0	17,9	42,4

Расчитанные значения потенциала плазмы представлены на рис. 9. Полученное распределение потенциала позволяет утверждать, что в установке создается необходимое для вращения электрическое поле, поскольку вычисленные значения потенциала коррелируют с измерениями с оптических диагностик.

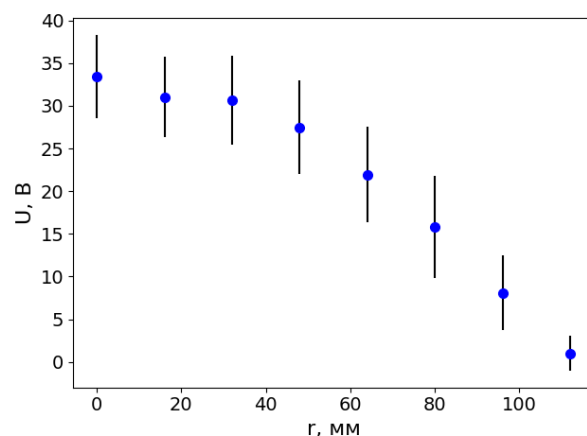


Рис. 9 Радиальное распределение потенциала плазмы

6. Заключение

В результате выполнения данной работы были получены следующие результаты:

1. была собрана и откалибрована измерительная система эмиссионного зонда для измерения радиального распределение электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА;
2. проведён эксперимент по измерению значений плавающего потенциала эмиссионного зонда в разных точках по радиусу плазмы;
3. получено радиальное распределение электрического потенциала плазмы в установке СМОЛА.

Полученное распределение предполагается использовать для получения информации о вращении плазмы. Данные хорошо согласуются с результатами экспериментов, проводившихся с участием оптических диагностик.

7. Список литературы

1. R. Schrittwieser, C. Ioniță, P.C. Balan et al. *Emissive Probes, Principles and Recent Developments*. (2004) // <https://www.semanticscholar.org/paper/Emissive-Probes-%2C-Principles-and-Recent-Schrittwieser-Ioni/20be55d1bf5ed7014efddf59e8cf2204cf93bb50>
2. C. Ionita, B. S. Schneider, S. Costea et al. *Plasma potential probes for hot plasmas*. Eur. Phys. J. D (2019)
3. Н. А. Капцов. *Электроника*. М.: ГИТТЛ, 1954, 467 с.