

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

Физический факультет
Кафедра общей физики

Ларичкин Михаил Валерьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА
**Электростатический зонд для измерения профиля плотности
плазмы**

Электромагнитный лабораторный практикум, 2 курс, группа 18310

Научный руководитель
_____ А. В. Судников
«___» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума
_____ А. А. Павлов
«___» _____ 2019 г.

Куратор практикума
_____ В. Т. Астрелин
«___» _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019

Аннотация. Целью работы являлось получение данных о профиле плотности плазмы в транспортной секции винтовой магнитной ловушки с температурой ~ 5 эВ и максимальной плотностью до 10^{19} м^{-3} посредством измерения ионного тока насыщения через зонды. Задачей данной работы являлись проектирование и сборка конструкции, состоящей из трёх двойных электростатических зондов, измерительной схемы и шагового двигателя для перемещения зондов вдоль профиля плазмы и проведение серии экспериментов в режиме с прямым магнитным полем. В ходе работы спроектирована и изготовлена система из трёх зондов, с их помощью исследован профиль плотности плазмы в спиральной магнитной открытой ловушке. Показано, что профиль плотности плазмы с хорошей точностью описывается нормальным распределением, максимальная плотность в исследуемом режиме составляет $0,657 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Работа проводилась на винтовой открытой ловушке СМОЛА в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	5
2.1. Общие сведения об электростатических (цилиндрических) зондах....	5
2.2. Двойные ленгмюровские зонды.....	7
3. Практическая часть.....	10
3.1. Разработка и сборка зондов.....	10
3.2. Измерительная схема.....	12
3.3. Порядок проведения измерений.....	13
3.4. Обработка измерений	14
3.5. Анализ полученных данных.....	15
3.6. Возможные источники ошибок.....	16
4. Заключение.....	17
5. Список литературы.....	18
6. Приложение.....	19

1 Введение

Целью данной работы является измерение профиля плотности плазмы на установке СМОЛА (спиральная магнитная открытая ловушка) ИЯФ СО РАН. Схема установки приведена на Рис. 1а. Для достижения данной цели было необходимо решить ряд задач:

1. Проектировка и сборка системы из трёх двойных электростатических зондов.
2. Проектировка и сборка удобной и, по возможности, универсальной измерительной схемы для системы зондов.
3. Крепление зондов к шаговому двигателю и сборка схемы управления шаговым двигателем по имеющемуся проекту с целью оптимизации измерений и автоматизации последующей работы с зондами.
4. Проведение измерений.

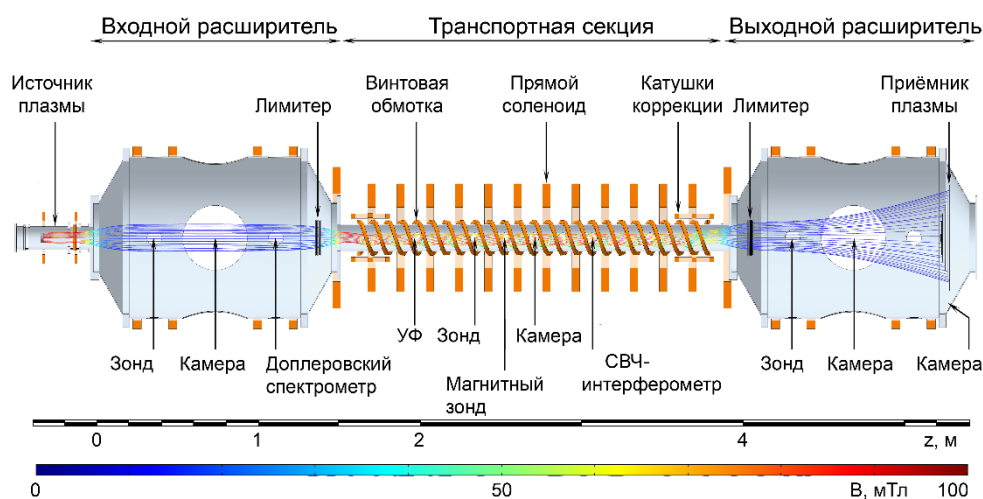


Рис. 1а. Схема винтовой открытой ловушки СМОЛА.

Установка СМОЛА, на которой выполнялась данная работа, достаточно новая (физический запуск осуществлен 2017 году) и нуждается в измерительном оборудовании, которое бы позволило измерять и уточнять параметры плазмы. Основной частью установки является транспортная секция, состоящая из 12 периодов многопробочного магнитного поля с винтовой симметрией и шагом 0.18 м. В транспортной секции может создаваться как прямое, так и винтовое поле с произвольно изменяемой глубиной гофрировки. Плотность является

одним из важнейших параметров плазмы, и особенно важно иметь представление о её распределении в профиле с учётом специализации установки СМОЛА, а именно: экспериментальная проверка теории об эффективном удержании плазмы в винтовом магнитном поле. В режиме динамического многопробочного (винтового) удержания плотность плазмы спадает по длине транспортной секции, при этом плотность плазмы на периферии плазменного шнура спадает быстрее, чем на магнитной оси. Ранее измерения плотности в установке производились только во входном и выходном расширителях, тем самым, использовать для измерения плотности плазмы электростатический зонд целесообразно. Впервые такие зонды начали применяться для исследования плазмы Ленгмюром (Langmuir) ещё в 1924 г. Относительная простота конструкции зондов Ленгмюра и большой объем получаемой информации делает этот метод измерений одним из важнейших. Следует отметить, что зондовые методики широко используются для измерения параметров околоземной плазмы ($n \sim 10^{12} \text{ м}^{-3}$), плазмы газовых разрядов ($n \sim 10^{14} - 10^{22} \text{ м}^{-3}$), периферийной плазмы крупных токамаков ($n \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$) и т.д.

2 Теоретическая часть

2.1 Общие сведения об электростатических (цилиндрических) зондах

В простейшем варианте зондовой методики измеряется зависимость тока на зонд от приложенного к нему напряжения, т.е. измеряется вольт-амперная характеристика зонда. Анализ этой характеристики в общем случае представляет собой сложную многопараметрическую задачу.

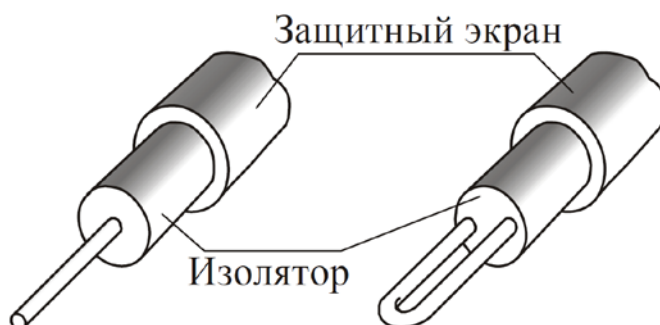


Рис. 1. Цилиндрические зонды.

Одиночные зонды можно разделить на несколько видов в зависимости от формы его собирающей поверхности. Цилиндрические зонды (рис.1), наиболее просты в изготовлении и поэтому применяются чаще других. Кроме того, их можно прогревать до достаточно высокой температуры, пропуская по зондовой проволоке ток. Этот прогрев до температуры порядка 1000°С очищает поверхность зонда от различных диэлектрических пленок, которые мешают измерениям.

Электрическое поле, возникающее при подаче на зонд напряжения, меняет характер движения заряженных частиц вблизи него и их плотность. Зонд, работающий в режиме отталкивания частиц одного сорта, например, электронов (т.е. зонд находится под отрицательным потенциалом), создает вокруг себя область, где плотность частиц другого сорта выше, чем в окружающей невозмущенной плазме. Легче всего оценить размеры этого переходного слоя при больших разностях потенциала между зондом и плазмой. Тогда можно считать, что переходный слой работает как диод, ток в котором ограничен полем пространственного заряда собираемых зондом частиц. На внешнюю границу слоя поступает поток частиц, равный по порядку величины тепловому $\frac{n_e v_T}{4}$. Толщина слоя при изменении напряжения подстраивается под эту плотность тока, следуя закону «трех вторых»:

$$j \propto \sqrt{e} U^{3/2} / 9\pi \sqrt{m} d^2 ,$$

где m – масса частиц, d – размер слоя.

Самым простым является случай, когда толщина слоя пространственного заряда вокруг зонда мала по сравнению с его характерным размером. Тогда задача о нахождении тока на зонд в зависимости от потенциала на нем становится фактически одномерной.

Если зонд находится под большим отрицательным потенциалом по отношению к окружающей плазме, то электроны не могут попасть на зонд. В этом случае все ионы, попадающие на внешнюю границу слоя, попадают на

зонд, и плотность тока на него не зависит от потенциала и равна ионному току насыщения (рис. 2).

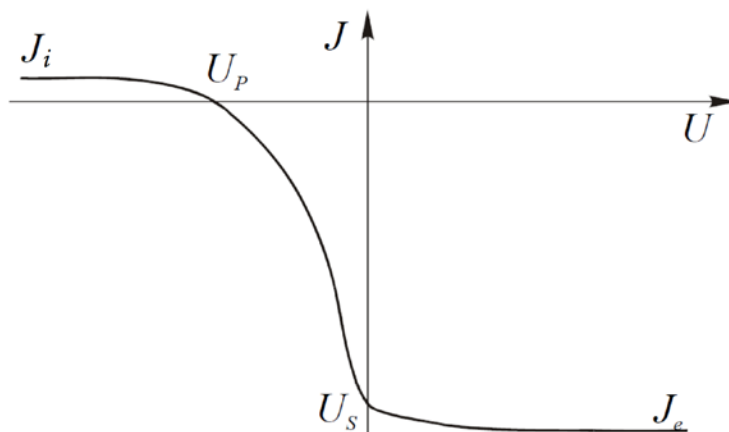


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика одиночного зонда Ленгмюра, где J_i – ионный ток насыщения, U_s – потенциал электронного тока насыщения.

Если же потенциал на зонде положительный и достаточно большой (чтобы ионы не могли попасть на него), все электроны, попадающие на границу слоя, собираются зондом и плотность тока равна электронному току насыщения. Плотность электронного тока насыщения равна

$$j_e = \frac{en_e v_T}{4}.$$

При дальнейшем уменьшении модуля отрицательного потенциала на зонде наступит момент, когда суммарный ток на зонд окажется равным нулю. При этом говорят, что зонд находится под плавающим потенциалом (U_p) по отношению к плазме (рис.2). Именно этот потенциал приобретает помещенное в плазму изолированное тело. Его величина определяется балансом ионного тока насыщения:

$$j_i = \frac{en_e v_{Ti}}{4},$$

и тока электронов, который подчиняется нормальному распределению:

$$j_e = \frac{en_e v_{Te}}{4} \cdot e^{-\frac{eU}{T_e}}.$$

2.2 Двойные ленгмюровские зонды

Снятие вольтамперной характеристики предполагает, что напряжение подается на зонд относительно некоторой точки, чаще всего относительно

“земли” установки. Вследствие этого возникают разного рода трудности, если в плазме присутствуют большие электрические поля. В этом случае применение находят двойные зонды Ленгмюра. Такой зонд состоит из двух одиночных зондов, между которыми прикладывается напряжение и измеряется текущий между ними ток. Суммарный ток, текущий на оба зонда, равен нулю. Поскольку тепловой ток электронов много больше, чем ионный (т.к. $\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \gg \sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}$), отсюда следует, что независимо от величины поданного между ними напряжения каждый из зондов находится под отрицательным потенциалом по отношению к окружающей плазме. Тогда можно заключить, что на каждый зонд идет ионный тепловой ток насыщения $j_{i0} = \frac{en}{4} \langle v_i \rangle$.

Что касается электронов, то они собираются зондами в режиме отталкивания, так что плотность электронного тока на зонды соответственно:

$$\frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-\frac{eU_1}{T_e}} \text{ и } \frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-\frac{eU_2}{T_e}},$$

где U_1 и U_2 – потенциалы зондов. Предполагая, что площадь собирающей поверхности зондов одинакова, можно получить ток, текущий в цепи между зондами, следующим образом:

$$J = S \cdot \left(\frac{en}{4} \langle v_i \rangle - \frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-\frac{eU_1}{T_e}} \right) = S \cdot \left(\frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-\frac{eU_2}{T_e}} - \frac{en}{4} \langle v_i \rangle \right).$$

Далее принимая во внимание, что полный ионный ток на зонды равен электронному, то есть

$$2j_{i0} = j_{e0} \cdot \left(e^{-\frac{eU_1}{T_e}} + e^{-\frac{eU_2}{T_e}} \right),$$

где $j_{e0} = \frac{en}{4} \langle v_e \rangle$ – электронный ток насыщения.

Отсюда выражается электронный ток насыщения через ионный и подставляется в формулу для полного тока в цепи двойного зонда. Получившееся выражение имеет вид:

$$J = S \cdot \left(j_{i0} - \frac{2j_{i0}}{e^{-\frac{eU_1}{T_e}} + e^{-\frac{eU_2}{T_e}}} \cdot e^{-\frac{eU_1}{T_e}} \right) = S \cdot \frac{j_{i0} \cdot (e^{-\frac{eU_2}{T_e}} - e^{-\frac{eU_1}{T_e}})}{e^{-\frac{eU_1}{T_e}} + e^{-\frac{eU_2}{T_e}}}$$

или

$$J = S \cdot j_{i0} \cdot th\left(\frac{e(U_1 - U_2)}{2T_e}\right). \quad (1)$$

Примерная вольт-амперная характеристика двойного зонда представлена на рисунке:

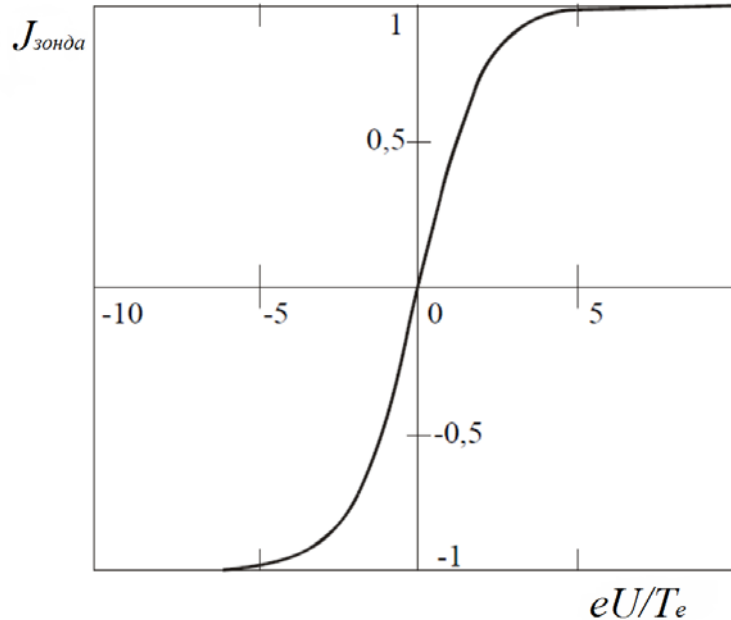


Рис. 3. Зависимость тока двойного зонда (в ед. $j_{i0}S$) от разности потенциалов на электродах зонда.

Как видно из выражения для зондового тока, наклон характеристики в точке $U = 0$ равен $\frac{j_{i0} \cdot S \cdot e}{2T_e}$, так что, зная величину наклона, можно определить температуру плазмы из отношения:

$$T_e = \frac{e j_{i0} S}{2 \frac{dJ_{\text{зонда}}}{dU}(0)}.$$

Разумеется, для корректности измерений необходимо, чтобы потенциал плазмы, а также ее плотность и температура мало менялись на расстоянии между электродами двойного зонда.

Как видно из формулы (1), если подать на зонд напряжение U во много раз большее, чем T_e/e , то ток J , текущий через электроды двойного зонда будет равен ионному току насыщения j_{i0} . Отсюда можно получить соотношение на плотность плазмы:

$$n = \frac{4J}{S\langle v_i \rangle e}, \quad (2)$$

где $\langle v_i \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}$.

3 Практическая часть

3.1 Разработка и сборка зондов

Для получения информации о профиле плотности плазмы необходимо проводить измерения одновременно вдоль обеих координат профиля. Для решения этой задачи была предложена конструкция из трёх двойных электростатических зондов Ленгмюра, которые крепятся к штоку шагового двигателя. Такая конструкция позволяет перемещать зонды вдоль одной координаты профиля с помощью шагового двигателя и при этом получать информацию сразу о трёх точках второй координаты. Каждый зонд в отдельности представляет из себя два молибденовых электрода, вставленных в керамическую трубку диаметром 1,55 мм с двумя каналами. Молибден выбран в качестве материала для электродов из-за достаточно высокой температуры плавления ($\sim 2600^\circ\text{C}$).

На данном этапе работ решалась достаточно важная инженерная задача, а именно, крепление зондов к штоку шагового двигателя. Проблематика задачи состояла в том, что для более качественных и информативных измерений вдоль второй координаты (вдоль которой шток двигателя не перемещается) необходимо как можно дальше друг от друга разнести три зонда, при этом вся конструкция ограничена в размерах вакуумными фланцами. Чертеж разработанного крепежа приведён в приложении к данной работе. Расстояние между соседними зондами удалось сделать 2,22 см, однако расстояние между проекциями зондов на поперечное сечение плазмы при измерениях составляло ~ 2 см из-за того, что при монтаже зондов на установку вся конструкция оказалась повернута на несколько градусов. На следующем этапе сборки керамические трубки длиной 10 см клеивались в крепежную пластину с помощью небольших капель цианоакрилата. Длина трубок в 10 см выбрана из

расчёта, что диаметр вакуумной камеры, в которой протекает плазменный разряд, составляет 15,7 см, ход штока шагового двигателя 10 см, и нужно провести замеры плотности плазмы около центра камеры. В полностью «выдвинутом» из плазмы положении электроды находятся на уровне стенки вакуумной камеры.

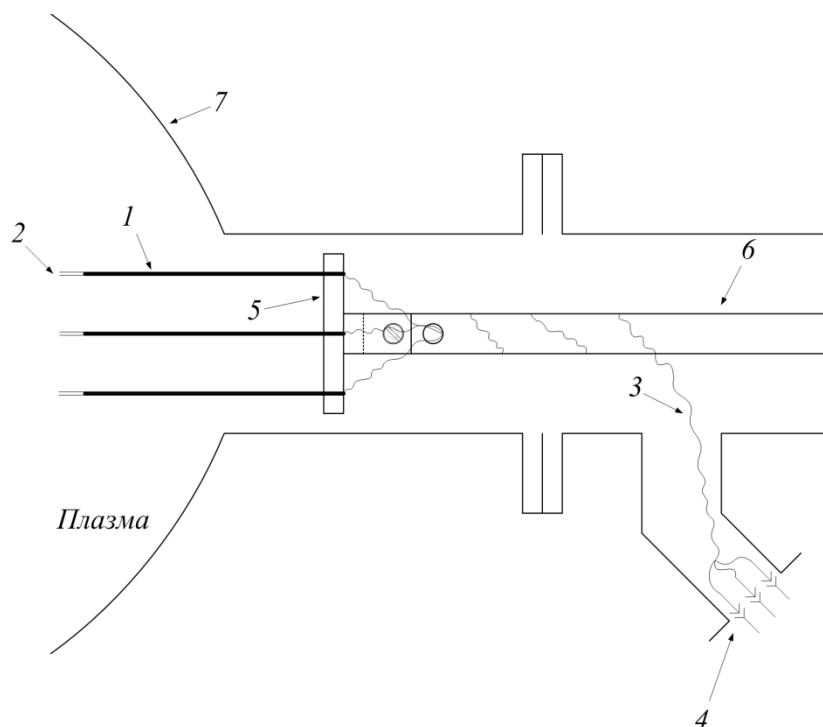


Рис. 4. Принципиальная схема конструкции из трёх зондов. 1 – керамическая трубка, 2 – молибденовые электроды, 3 – три витых пары измерительных проводов, 4 – вакуумный разъем, 5 – крепёж для электродов, 6 – шток шагового двигателя, 7 – стенка вакуумной камеры.

В трубки вставлялись по два молибденовых провода диаметром 0,2 мм, так, чтобы длина помещённых в плазму электродов составляла ~5 мм. Далее к каждому электроду с помощью лазерной сварки приваривался медный провод, место сварки изолировалось, и крепеж монтировался на шток шагового двигателя. Далее шесть медных проводов (по два от каждого зонда) скручивались в три витых пары и, обвиваясь вокруг штока шагового двигателя, выводились на вакуумный разъем. Это сделано для того, чтобы минимизировать площадь контуров, образуемых проводами, чтобы тем самым уменьшить наводки со стороны больших переменных магнитных полей, которые возникают

в процессе работы установки СМОЛА. Принципиальная схема конструкции приведена на рисунке 4.

3.2 Измерительная схема

После монтажа системы зондов на установку СМОЛА производилась сборка измерительной схемы. При её проектировке преследовались следующие цели:

1. Минимизация сторонних наводок и шумов.
2. Возможность проведения измерений как при относительно больших, так и при небольших значениях ионного тока насыщения.
3. Получение на зондах напряжения заведомо выводящего нас в режим насыщения.

В основе измерительной схемы использовались три DC/DC преобразователя AM2D-0512DH30Z, переводящие 5,2 В постоянного напряжения в приблизительно -12,5 В и +12,5 В на выходных контактах, благодаря этому можно подать на зонды разность потенциалов в ~25 В. Если учесть, что рабочая температура водородной плазмы, которая использовалась при проведении измерений на установке СМОЛА, составляет ~5 эВ, то можно подставить $U_1 - U_2 = 25 \text{ В}$ в выражение (1):

$$J = S \cdot j_{i0} \cdot th(2,5) \approx 0,987 \cdot S \cdot j_{i0} , \quad (3)$$

из выражения (3) видно, что разности потенциалов на электродах зонда в 25В вполне достаточно для того, чтобы выйти в режим насыщения.

На входы и выходы преобразователей были установлены конденсаторы ~25мкФ для фильтрации высокочастотных шумов (см. рис. 5).

Для унификации схемы, для возможности измерения различных диапазонов плотности шунтирующее сопротивление было выполнено переключаемым (см. рис. 5) из параллельно соединённых резисторов номиналами в 200 Ом (подключаемое опционально) и 1000 Ом (включенное постоянно) на положительном выходе преобразователей постоянного тока.

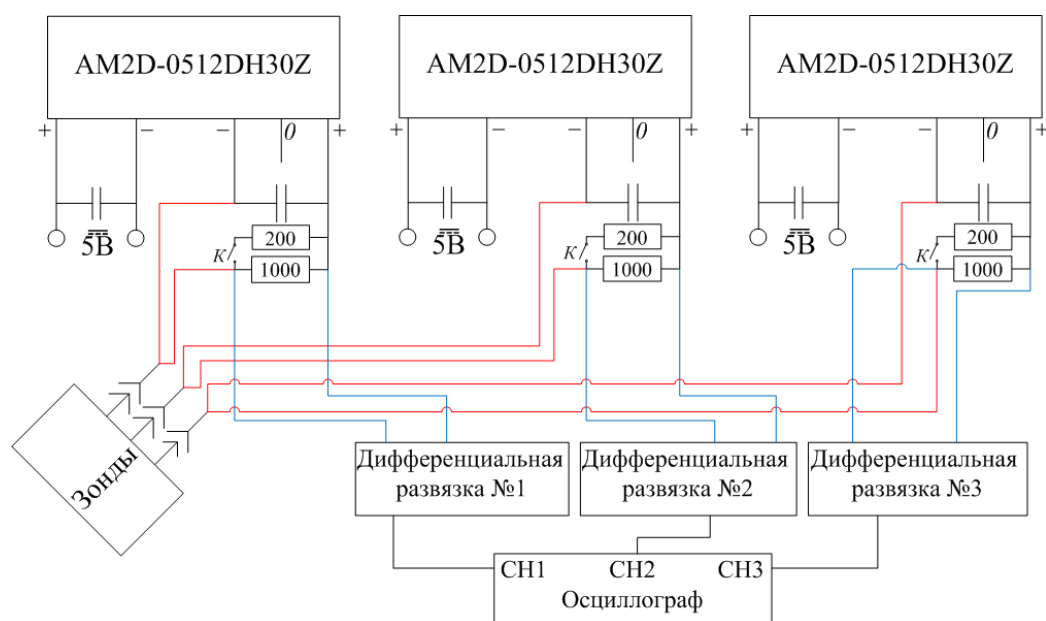


Рис. 5. Измерительная схема.

Общий принцип работы схемы следующий: на вход преобразователей постоянного напряжения подаётся постоянное напряжение 5–6 В с помощью источника питания АКИП-1105, с выходов каждого из преобразователей 24–30 В подаются в последовательную цепь из резисторов и зонда. При протекании в этой цепи тока (ионного тока насыщения) падение напряжения на резисторе в 1000 Ом фиксируется через дифференциальные развязки TESTEC TT-SI9001 на осциллографе Tektronix DPO2004B в режиме одиночной развертки. При этом длина развертки подбирается примерно равной времени разряда (около 300 мс). Дифференциальные развязки работали в режиме деления 1/10, что компенсировалось множителем X10 на осциллографе.

3.3 Порядок проведения измерений

После сборки измерительной схемы зонды были выведены на расстояние 6 см от стенки вакуумной камеры, после чего было проведено несколько «холостых» выстрелов для вывода всей установки в стационарный режим работы и удаления оксидной пленки с поверхности электродов, которая препятствовала бы получению качественного сигнала.

Измерения проводились с шагом в 5 мм, начиная с 1 см от стенки, где токи насыщения на всех трёх зондах стали заметно отличны от нуля и вплоть до предельного положения штока шагового двигателя (10 см). На всех целых

координатах (10 см, 9 см, 8 см и т.д.), кроме 1 см проводилось по три разряда для увеличения точности измерений, на не целых координатах проводилось по одному. При этом получившаяся при каждом разряде развёртка осциллографа сохранялась на информационный носитель с помощью функции save в формате .csv для последующей удобной обработки. Общий вид развертки для одного зонда продемонстрирован на рисунке 6 на примере одного из крайних зондов на расстоянии 10 см от стены вакуумной камеры.

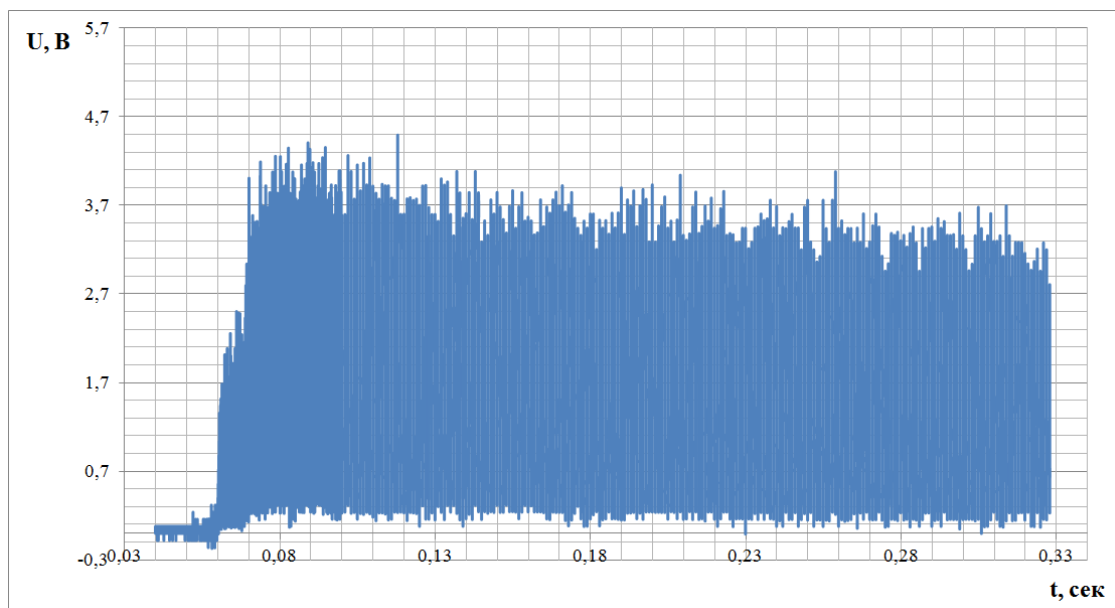


Рис. 6. Вид осциллограммы для одного из крайних зондов на расстоянии 10 см от стенки вакуумной камеры.

3.4 Обработка измерений

Полученная зависимость $U(t)$ усреднялась по времени. Далее определялся ток в цепи: $J = U_{\text{ср.}}/R$, где R – включенное в цепь при исследуемом разряде сопротивление (1000 Ом или 166 Ом). Далее, используя выражение (2), определяется плотность плазмы. Действующая площадь электродов в этом выражении была найдена как: $S = \pi l d / 2$, где $l \approx 5$ мм, $d = 0,2$ мм, а коэффициент $1/2$ появился из того расчёта, что плазма налетает на электроды только с одной стороны, то есть на обратную сторону электрода ток почти не течёт. Полученные результаты можно видеть в таблице 1, плотности в целых координатах уже усреднены по трём измерениям. В таблице приведены значения плотностей n_1 , n_2 и n_3 для координат $y = 2, 0$ и -2 см соответственно.

Таблица 1.

$x, \text{см}$	$n_1, 10^{18} \cdot \text{м}^{-3}$	$n_2, 10^{18} \cdot \text{м}^{-3}$	$n_3, 10^{18} \cdot \text{м}^{-3}$
1	0,082	0,421	0
1,5	0,147	0,542	0,074
2	0,275	0,775	0,242
2,5	0,489	1,11	0,408
3	0,794	1,75	0,728
3,5	1,52	2,64	1,09
4	2,23	3,52	1,63
4,5	2,89	4,38	2,29
5	3,42	4,88	2,81
5,5	3,72	5,69	3,35
6	4,08	6,03	3,91
6,5	4,41	6,21	4,41
7	4,86	6,25	4,69
7,5	4,65	6,31	4,90
8	4,85	6,57	4,91
8,5	4,50	6,17	4,45
9	4,34	5,99	4,13
9,5	3,97	5,78	3,46
10	3,80	5,59	2,98

Дальнейшая обработка измерений включает в себя определение погрешностей для измерений в целых координатах. Вычислялись погрешности по следующей формуле:

$$\Delta n = k \cdot \sqrt{D[n]},$$

где $D[n]$ – дисперсия по трём измерениям в данной точке, а k – коэффициент Стьюдента, выбранный для надёжности 90%, т.е. $k \approx 2,9$.

3.5 Анализ полученных данных

Было замечено, что плотности n_1 , n_2 и n_3 принимают свои максимальные значения около координаты $x = 8$ см, значит, с хорошей точностью можно сказать, что центр распределения лежит именно в этой координате и около $y = 0$, так как плотность в области центрального зонда во всех измерениях больше, чем в областях крайних. Так как плотности в координатах (8, 0), (8, 2) и (8, -2) известны, было посчитано теоретическое распределение плотности с центром в (8, 0), а потом построена его зависимость от x (здесь и далее речь идёт о нормальном распределении). На рисунке 7 можно видеть график, на котором отмечены точки реальных измерений и поведены кривые теоретических распределений. На рисунке 8 можно видеть $n_i(x)$ с нанесёнными крестами погрешностей. Объединение рисунков 7 и 8 приведено в приложении.

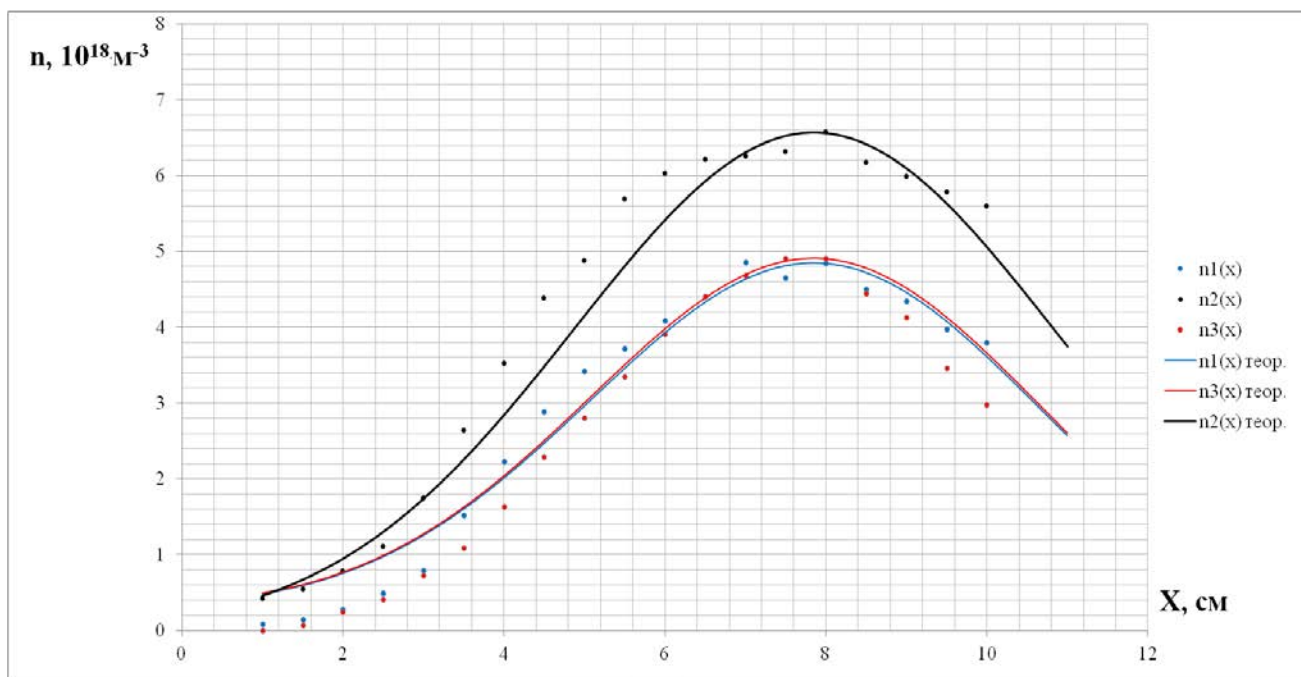


Рис. 7. Зависимости n_1 , n_2 и n_3 от x и наложенные на них кривые теоретических распределений.

Погрешность в измерении координаты x была оценена в ± 3 мм, вызвана она тем, что шток шагового двигателя при перемещении имеет отклонения в плоскости перпендикулярной штоку, а также сжатием уплотняющих резинок, которое хоть и было как-то учтено при проектировке конструкции, является сложно предсказуемым. Кроме того, молибденовые электроды имеют ненулевой размер.

3.6 Возможные источники ошибок

К возможным источникам ошибок, помимо тех, что были упомянуты выше, могут быть отнесены также:

1. Наличие наводок со стороны больших и быстроменяющихся полей установки СМОЛА.
2. Человеческий фактор. Молибденовые электроды обрезались вручную и их одинаковая длина для разных зондов не гарантирована, не идеально вклеенные керамические трубки и другие ошибки.
3. Наличие высокочастотных колебаний потенциала плазмы, наличие которых можно явно видеть на осциллограммах, что вносит ошибки в получение значений тока насыщения.

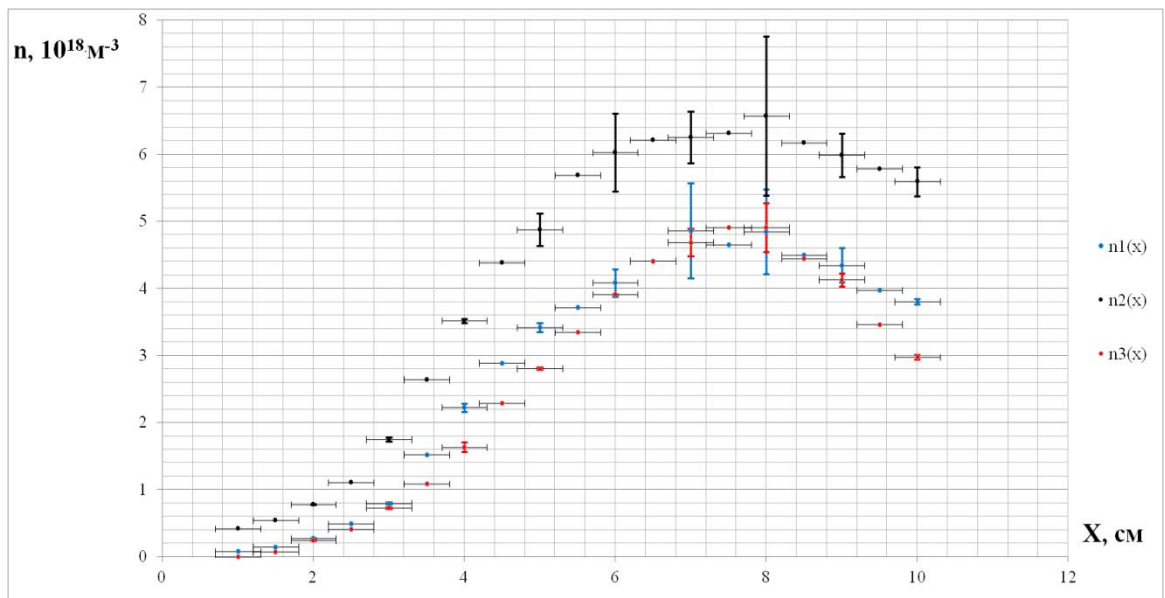


Рис. 8. Зависимости n_1 , n_2 и n_3 от x , с нанесёнными крестами погрешностей для целых координат.

4 Заключение

Результатами проделанной работы являются:

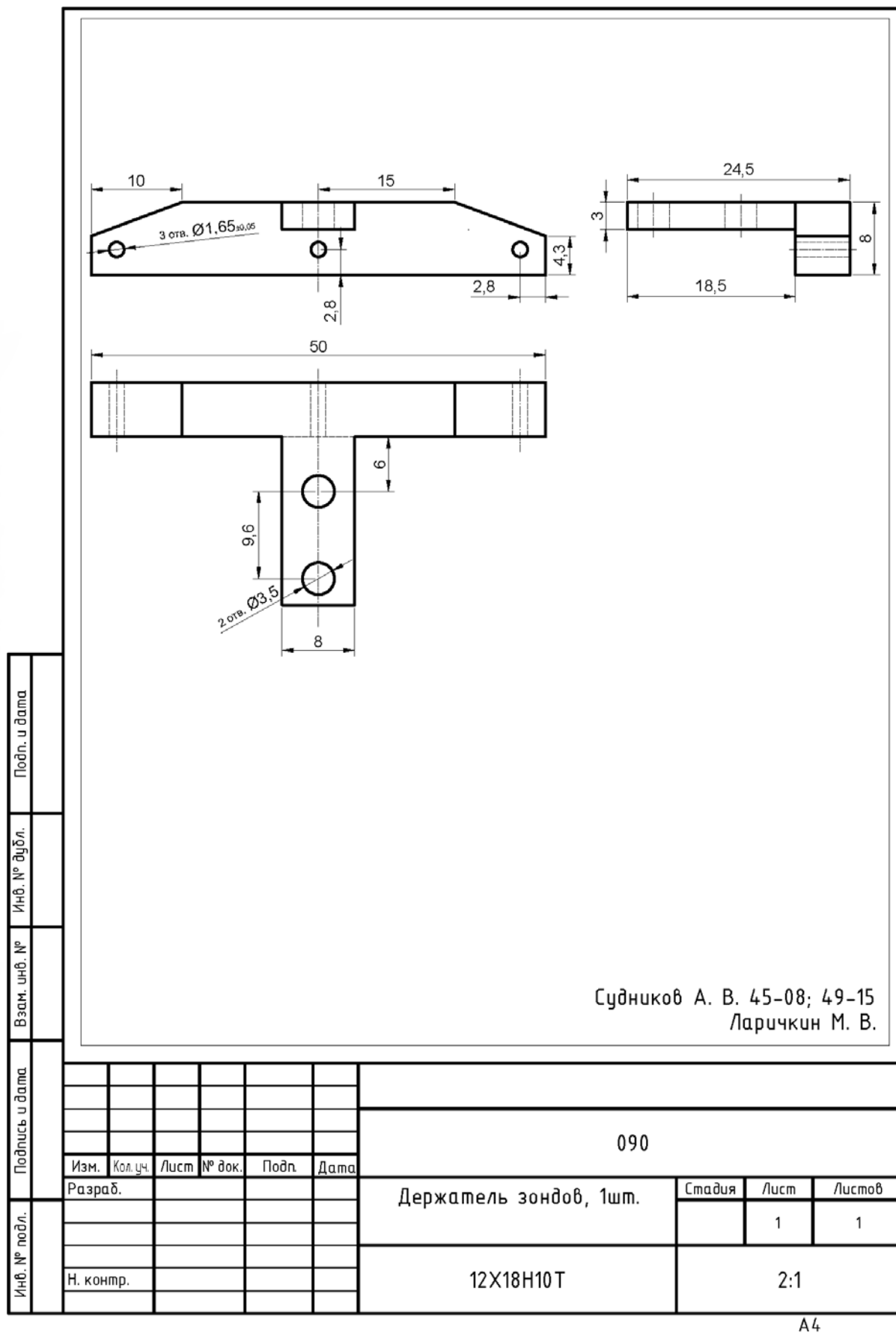
1. Работающая система из трёх двойных электростатических зондов, которая позволяет получать информацию о плотностях в профиле плазмы. Значения плотностей, полученные с помощью собранных зондов, являются вполне правдоподобными (т.е. 10^{18} - 10^{19} частиц на m^3). Статистическое отклонение измерений зондов невелико и составляет $\langle \frac{\Delta n}{n} \rangle \sim 2-5,5\%$.

2. Установлен вид распределения плотности в профиле плазмы, он с хорошей точностью соответствует нормальному распределению.

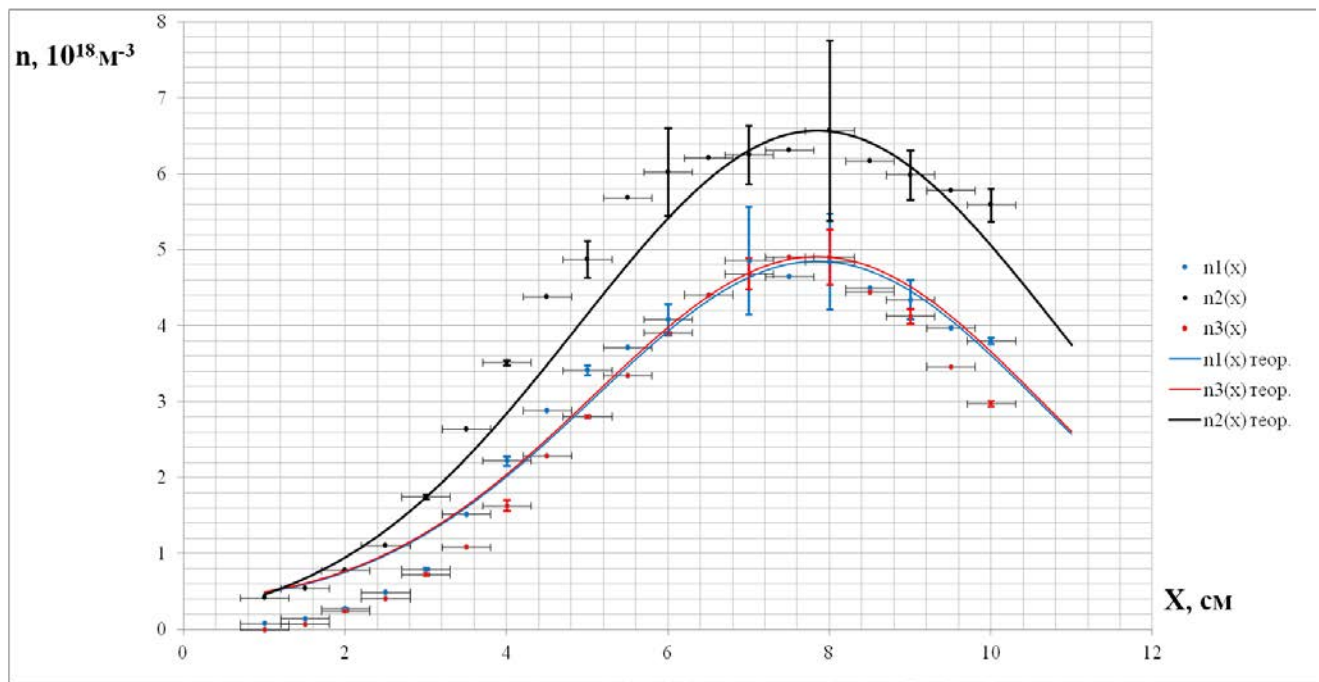
5 Список литературы

1. В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Лекции для студентов физического факультета, 1999.
2. И.А. Котельников. Лекции по физике плазмы. Учебное пособие для студентов и аспирантов, 2018.
3. A. V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design 122C (2017) pp. 86-93, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005.
4. A.D. Beklemishev. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation // AIP Conf. Proc. 1771 (2016) 040006, doi: 10.1063/1.4964191.

6 Приложение



Приложение 1. Крепёж разработанный для крепления трёх двойных зондов Ленгмюра.



Приложение 2. Наложение рисунков 7 и 8.