

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра Физики плазмы

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Инжеваткиной Анны Александровны

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Исследование плазменной струи установки СМОЛА

методами пассивной спектроскопии

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2017

Оглавление	
Введение.....	3
Глава 1. Экспериментальные условия установки СМОЛА.....	5
Глава 2. Описание диагностической системы.....	8
2.1 Основные характеристики спектрального прибора .....	8
2.2 Схема спектрометра с пространственным разрешением.....	10
2.3 Определение дисперсии, аппаратной функции и пространственного разрешения спектрометра .....	12
2.4 Определение пространственного разрешения спектрометра .....	14
Глава 3. Определение пространственных характеристик плазмы из интегральных соотношений .....	17
3.1 Постановка задачи. Уравнение Абеля .....	17
3.2 Решение уравнения Абеля методом Пирса .....	18
3.3 Проверка применимости метода .....	20
Глава 4. Применение пассивной спектроскопии в экспериментах на установке СМОЛА.....	22
4.1 Отработка генерации плазменной струи .....	22
4.2 Радиальное распределение интенсивности излучения плазменного факела.....	23
4.3 Определение скорости плазмы по доплеровскому сдвигу .....	27
Заключение .....	29
Благодарности.....	30
Список литературы .....	31

## Введение

Одной из ключевых научно-технических проблем современности является экологическая безопасная генерация энергии [1]. Возможным решением данной проблемы в среднесрочной перспективе является овладение энергией термоядерного синтеза. На сегодняшний день наибольший прогресс среди термоядерных систем энергетики достигнут в замкнутых системах [2]. В то же время открытые магнитные системы для удержания плазмы, позволяющие контролировать плазму с более высоким относительных давлением, в перспективе могут дать ряд существенных преимуществ по сравнению с замкнутыми системами, включая возможность бестритиевого и бездейтериевого синтеза [3]. Основной проблемой удержания плазмы в таких ловушках является подавление потерь частиц и энергии с торцов.

Для решения этой проблемы была предложена концепция системы, которая бы активно накачивала плазму обратно в ловушку с помощью внешнего источника питания. Трудностью для создания плазменного насоса является создание силы, действующую на нее вдоль магнитного поля, для решения которой была предложена идея помещения вращающейся плазмы в спирально - симметричное стационарное поле.

Для экспериментальной проверки концепции винтового удержания [4] в ИЯФ СО РАН создаётся установка СМОЛА, основной задачей которой является управление течением плазменной струи в винтовом магнитном поле [5]. Концепция основана на создании движущихся в системе отсчёта плазмы магнитных пробок. В результате чего возникает сила, с помощью которой можно контролировать плазменные потоки: ускорять либо тормозить их.

Движение пробок относительно плазмы создаётся вращением плазмы в скрещенных радиальном электрическом и винтовом магнитных полях. Направление силы, действующей на плазму, так же, как и направление скорости зависит от направлений электрического и магнитного полей и спиральности обмотки. Торможение плазмы внешней силой обеспечивает

лучшее продольное удержание, что делает возможным получение более высоких параметров.

Определение пространственного разрешения азимутальной и продольной компонент скорости плазмы критически необходимо для построения модели управления потоком плазмы в винтовой ловушке. В качестве одного из методов диагностики скорости плазменной струи предполагается использовать диагностику доплеровского смещения спектральных линий с пространственным разрешением.

Спектрометр с пространственным разрешением позволяет получать сведения о различии спектров, излучаемых разными областями плазмы, что необходимо для определения локализации и пространственного распределения изучаемых параметров.

Основная цель данной работы: диагностика доплеровского уширения и сдвига спектральных линий плазмы в открытой ловушке с винтовыми секциями, для реализации которой были выдвинуты следующие задачи:

1. Создать спектрометр с пространственным разрешением, способный разрешить необходимый сдвиг спектральных линий.
2. Определить его основные характеристики: дисперсию, пространственное разрешение и построить аппаратную функцию спектрометра.
3. Зарегистрировать спектральные линии плазменной струи.
4. По доплеровскому смещению спектральных линий определить скорость вращения плазмы.

## Глава 1. Экспериментальные условия установки СМОЛА.

Основная задача установки СМОЛА заключается в управлении течением плазменной струи в винтовом магнитном поле, для реализации чего необходимы управляемые винтовое магнитное поле, радиальное электрическое поле и плазма определенных параметров. Установка СМОЛА состоит из следующих основных частей: источника плазмы, пробочной винтовой секции длиной около 2,5 м и двух концевых баков-расширителей плазменного потока (Рис. 1) [6].

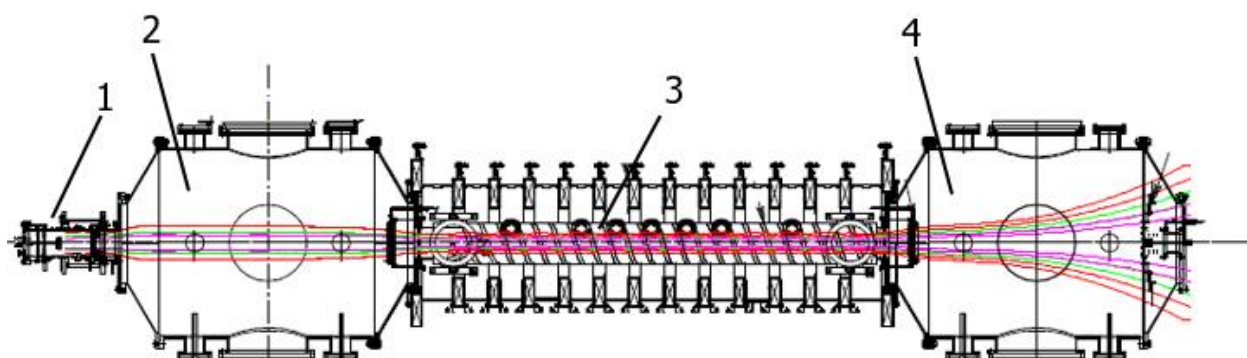


Рис. 1 Установка СМОЛА (вид сверху). 1 – плазменная пушка, 2,4 – расширители, 3 – винтовая секция.

Магнитная система включает в себя катушки плазменной пушки, катушки входного и выходного расширителей, центральный соленоид с винтовым полем, а также переходы между всеми частями [5]. В центральном соленоиде с помощью ряда плоских катушек создается аксиальная часть магнитного поля, а за счет четного числа спиральных проводников с противоположными токами индуцируется спиральность. Магнитная ось имеет вид трехмерной спирали с радиусом  $\sim 1,5$  см.

Соленоид, состоящий из 18 катушек с внутренним диаметром 18,5 см, расположенных с периодом 18 см, обеспечивает в рабочем объеме однородное магнитное поле с однородностью на уровне 1%. Центральные катушки

состоят из 90 витков с рабочим током 500 А. Максимальное рабочее поле может быть ~ 0,3 Тл.

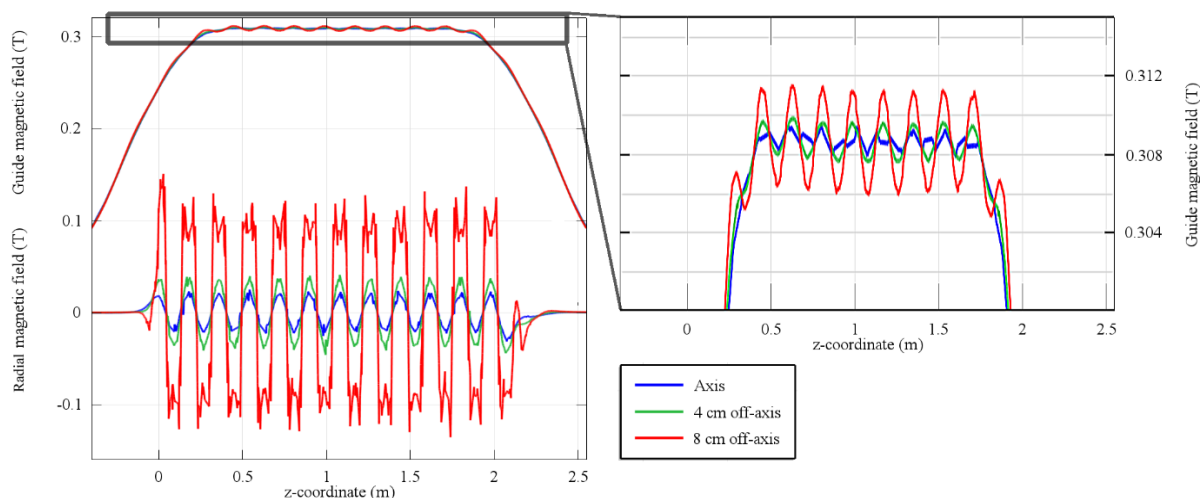


Рис. 2 Напряженность продольной и радиальной компонент магнитного поля в спиральной части на различном расстоянии от оси [6]

Основные расчетные параметры системы: радиус плазмы  $r = 5$  см, радиальное электрическое поле магнитное поле  $E_r \sim 100$  В/см.

Во вращающейся системе отсчета плазмы продольная скорость магнитных пробок равна:

$$V_z \approx c \frac{hE_r}{2\pi r B_z} \sim 10^7 \text{ см/с} \sim V_{||} \quad (1)$$

где  $h$  – шаг винта,  $r$  – радиус плазмы,  $E_r$  – радиальное электрическое поле,  $B_z$  – магнитное поле.

Плазменная осесимметричная пушка создана на основе ранее разработанного в ИЯФ СО РАН источника плазмы [7], создающего плазму с максимальной плотностью  $n \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T \sim 5$  эВ, схематично представлена на рисунке 3. С помощью инфракрасного нагревателя и разрядного тока катод нагревается до  $T \sim 2000$  К. Испускаемые катодом  $\text{LaB}_6$  электроны осуществляют ионизацию.

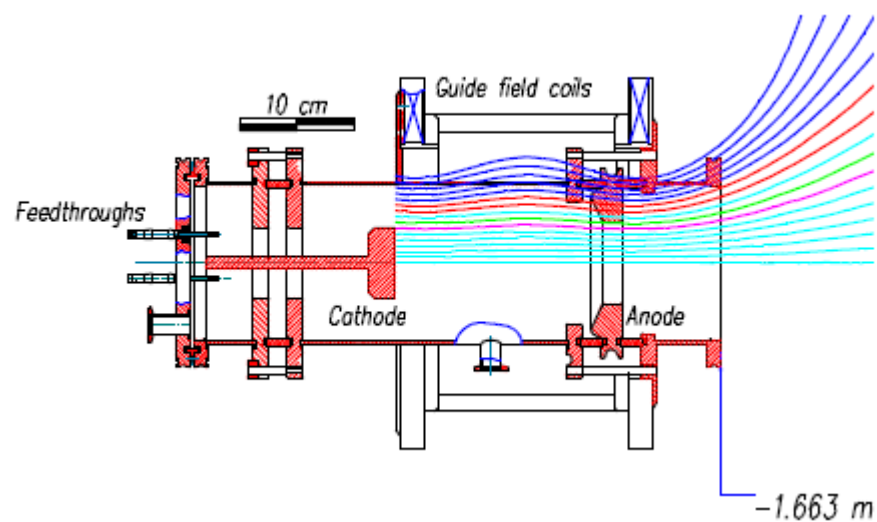


Рис. 3 Плазменная пушка

Потенциалы анода и катода плазменной пушки задаются независимо. Ведущее магнитное поле подавляет поперечную проводимость в плазменной пушке, поэтому большая часть тока протекает вдоль линий поля между внешним краем катода и внутренним краем анода и замыкается за счет поперечной проводимости в основном объёме. Необходимый режим работы создается в том случае, когда нет силовых линий поля, соединяющих катод и анод.

## Глава 2. Описание диагностической системы

### 2.1 Основные характеристики спектрального прибора

Направленное движение потока плазмы может быть зарегистрировано по доплеровскому смещению линий собственного излучения плазмы. Для регистрации и измерений уширения или сдвигов спектральных линий необходимо использовать высокочувствительный спектральный прибор, способный разрешить

$$\delta\lambda \sim \frac{V}{c}\lambda \sim \frac{E}{B}\lambda \sim 0,15 \text{ нм}$$

Характерная ширина диагностируемой плазменной струи составляет  $\sim 10$  см, расчетная дистанция съемки  $\sim 110$  см. Поскольку диагностика предназначена для исследования нестационарных процессов, в качестве регистрирующей системы использована высокоскоростная ПЗС-камера с выдержкой  $0,1 \div 30$  мс.

Для определения локализации и пространственного распределения изучаемых параметров спектрометр должен иметь пространственное разрешение, достигаемое за счёт дополнительной оптической системы.

В настоящее время промышленно производимых спектральных систем с необходимым нам спектральным, пространственным разрешениями и быстродействием не существует.

Для разложения изображения в спектр в работе применялся спектрометр на основе плоской дифракционной решётки. Нас будут интересовать следующие характеристика спектрометра: разрешающая способность, разрешение изображения, спектральное разрешение и дисперсия.

Спектральная линия спектрометра или аппаратная линия отображает распределение интенсивности по длине волны на выходе спектрометра, который освещен источником излучения. Такая линия в идеальном случае должна соответствовать бесконечно тонкой линии. Но в реальных условиях



любой спектрометр, регистрируя излучение, отображает контур конечной ширины, описываемый функцией  $f(A)$ , вид которой показан на рисунке 4.

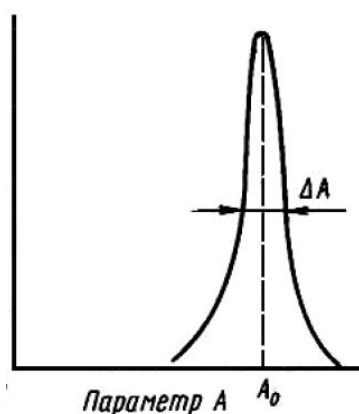


Рис. 4 Аппаратная функция  $f(A)$

Дисперсия – количественная характеристика пространственного разнесения лучей, отличающихся на длину волны  $d\lambda$ . Линейная дисперсия определяет расстояние  $dx$ , измеренное между точками (в пикселях), в которых собирается излучение длин волн, отличающихся на  $d\lambda$  и выражается как:

$$D = \frac{dx}{d\lambda}$$

Обычно для характеристики прибора используют обратную дисперсию:

$$D = \frac{d\lambda}{dx}$$

Пространственное разрешение - расстояние между двумя точками пространства, спектр излучения которых может быть различим.

Под разрешением изображения мы будем понимать величину, определяющую масштаб изображения:

$$R = \frac{N}{L}$$

Здесь  $N$  — количество точек (пикселей) на единицу длины  $L$  изображенного предмета.

## 2.2 Схема спектрометра с пространственным разрешением.

Для измерения скорости плазмы по доплеровскому уширению линий построен спектральный прибор по схеме аналогичной [8]. В данной схеме на регистрирующем элементе создается двумерное изображение, в котором по вертикальной оси расположена длина волны, по горизонтальной – пространственная координата. Схема прибора приведена на Рис.5

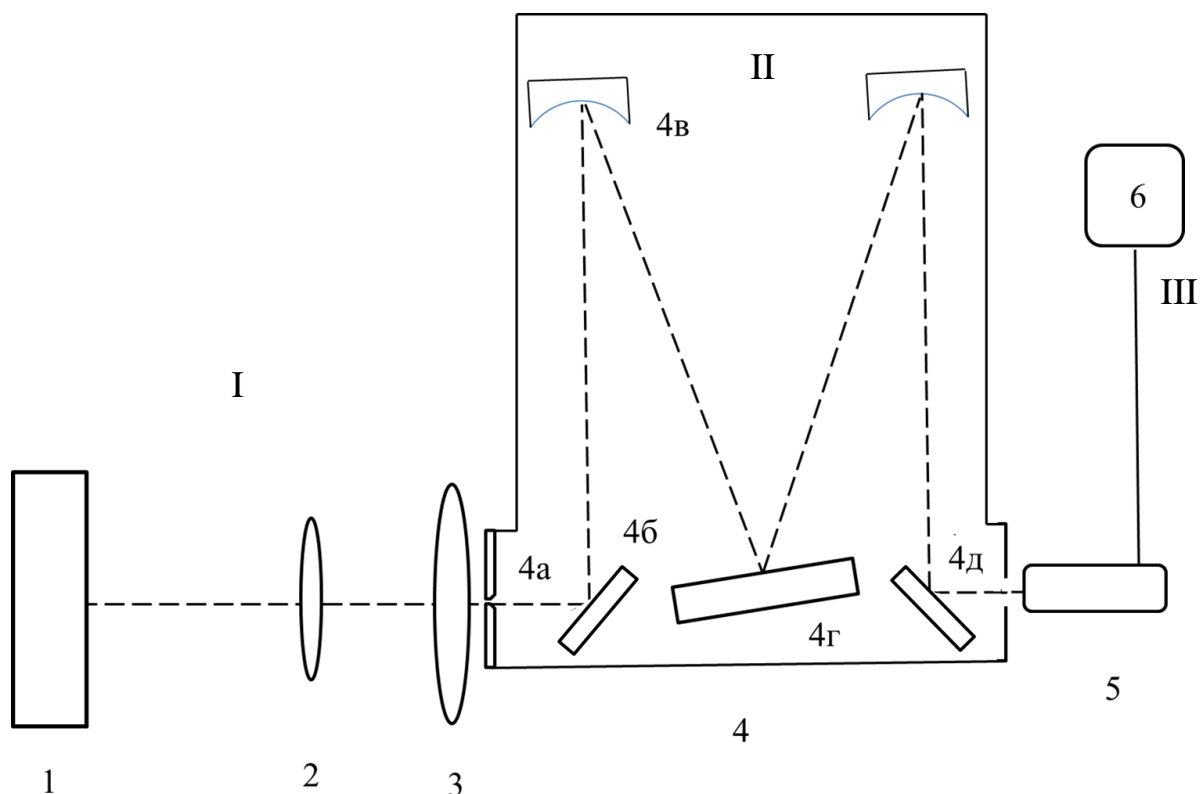


Рис. 5 Принципиальная схема спектрометра с пространственным разрешением

Данная схема имеет три основных блока: оптическая система (I), монохроматор МДР-12 (II), система регистрации (III).

Оптическая система, находящаяся на расстоянии 110 см от источника излучения (1), состоит из объектива (2) и длиннофокусной толстой линзы (3). Линза расположена на расстоянии 60 мм от объектива.

За линзой располагается монохроматор МДР-12 (4). Он имеет входную щель (4а), два зеркала (4б), два плоских зеркала (4в), дифракционную решетку (4г), и выходное отверстие (4д), на которое была заменена выходная щель монохроматора для того, чтобы получить двумерное изображение, на одной

оси которой расположена длина волны, на другой – пространственная координата.

Спектр регистрируется ПЗС камерой SDU-285 (5), имеющую высокочувствительную матрицу SONY ICX285AL со следующими параметрами: размер пикселя (мкм) 6,45 x 6,45, формат кадра 1392 x 1032, размер матрицы 8,77×6,6 мм. Изображение записывается в банк данных с помощью персонального компьютера (6).

Изображение источника фокусируется на входную щель спектрометра, далее раскладывается в спектр с помощью дифракционной решетки и затем регистрируется ПЗС камерой двумерным изображением.

Для монтажа оптической системы и системы регистрации с приемлемой точностью и устранения паразитной засветки были разработаны соответствующие элементы конструкции с возможностью тонкой регулировки пространственного положения.

В работе использованы объектив Мир-1 с фокусным расстоянием 37 мм, линза с фокусным расстоянием 150 мм, монохроматор МДР-12 с дифракционной решеткой, имеющей 600 штрихов на мм. В качестве калибровочного источника излучения использовались ртутная лампа и катод LaV<sub>6</sub>, находящиеся на расстоянии 110 см от спектрального прибора.

Характерная ширина плазменной струи, для которой создается диагностика, составляет ~10 см. При перечисленных выше параметрах объектива и линзы в поле зрения находится область, протяженность которой 20 см.

Перед началом использования монохроматор был отъюстирован при помощи полупроводникового лазера, излучающего на длине волны 650 нм (красный цвет).

### 2.3 Определение дисперсии, аппаратной функции и пространственного разрешения спектрометра

Спектральные характеристики прибора определялись по излучению эталонной дейтериевой лампы ДДС – 30, в которой источником излучения служит разряд с полым катодом в смеси дейтерия и водорода. Калибровка проводилась по линиям излучения  $D_{\alpha}$  (656,106 нм) и  $H_{\alpha}$  (656,278 нм). Изотопический сдвиг линий составляет 0,172 нм, что оценочно соответствует 7 пикселям ПЗС-матрицы. Полученные спектры позволяют определить как линейную дисперсию, так и ширину аппаратной функции спектрометра по всей ширине видимой области пространства. Кроме того, отличие изображения спектральной линии от прямой даёт возможность коррекции дисторсии спектрального прибора. Изображение спектра дейтериевой лампы приведено на Рис. 6.

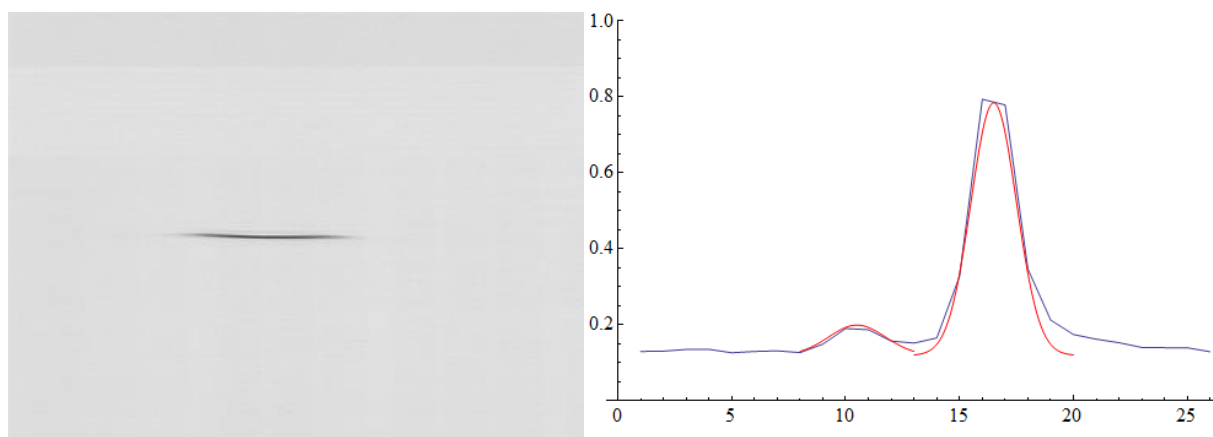


Рис. 6 Спектр дейтериевой лампы

Дисперсия спектрометра равна:

$$R = 40 \frac{px}{nm}$$

Наиболее интересным параметром спектрального прибора является его аппаратная функция, определяемая шириной изображения спектральных линий  $\delta\lambda$ , полученных с помощью этого прибора:

$$\delta\lambda = 4 px$$

Тогда ширина аппаратной функции спектрометра равна

$$\beta \approx 0,1 \text{ нм}$$

Полученная аппаратная функция спектрометра позволяет определить скорость плазмы с точностью до  $\sim 10^6$  см/с.

Пространственное разрешение спектрометра было определено съёмкой эталонных объектов с заданными размерами. В качестве первого эталонного объекта была использована ртутная лампа с непрозрачной маской из полос заданной ширины, внешний вид которой представлен на Рис. 7.

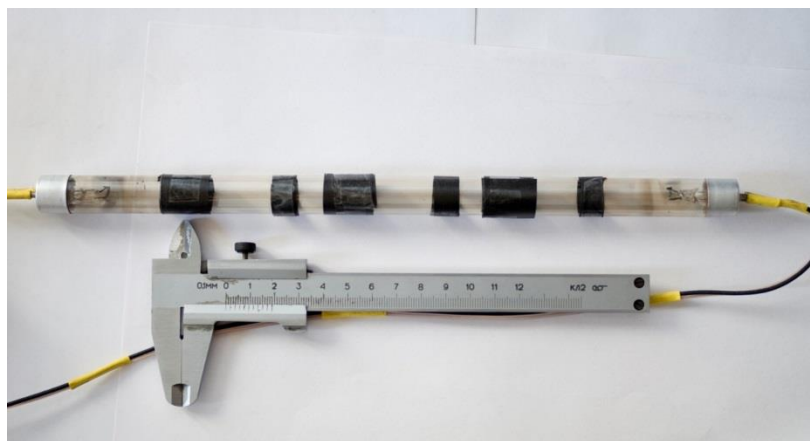


Рис. 7 Внешний вид ртутной лампы с маской

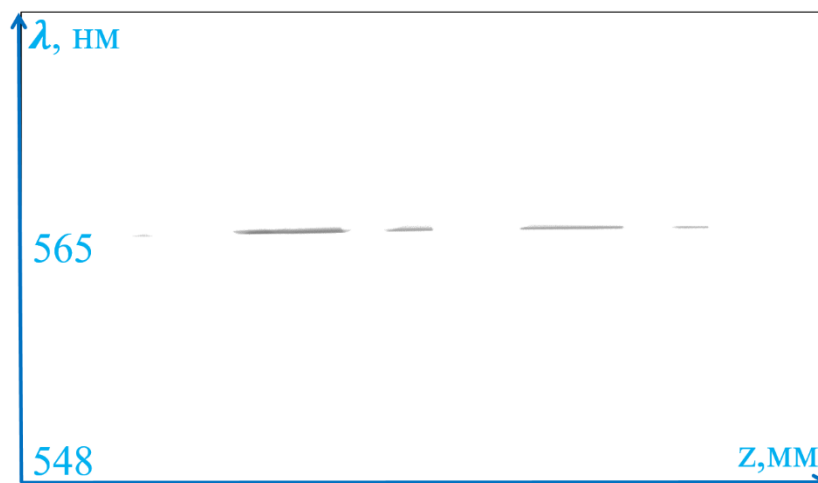


Рис. 8 Спектр ртутной лампы

На Рис. 8 показано изображение линии спектра ртутной лампы. В кадре находится левая часть маски.

Для нахождения разрешения изображения была взята черная полоса маски ртутной лампы, имеющая ширину 10 мм, и сопоставленное ей темное пятно, равное 70 пикселям. Масштаб изображения равен

$$R = 7 \frac{\text{px}}{\text{мм}}$$

## ***2.4 Определение пространственного разрешения спектрометра***

В качестве второго эталона использован спектр теплового излучения нагретого катода  $\text{LaB}_6$ , имеющего диаметр 50 мм.

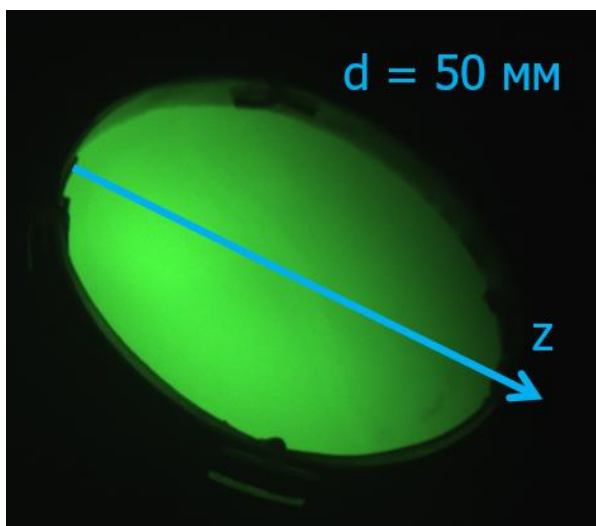


Рис. 9 Внешний вид нагретого катода  $\text{LaB}_6$  через сине-зеленый фильтр СЗС-21

Была сделана серия снимков спектров области  $\sim 500$  нм. На рис. 9 продемонстрирован непрерывный спектр катода, нагретого до  $T \sim 1800$  К, при заданной мощности 1100 Вт.

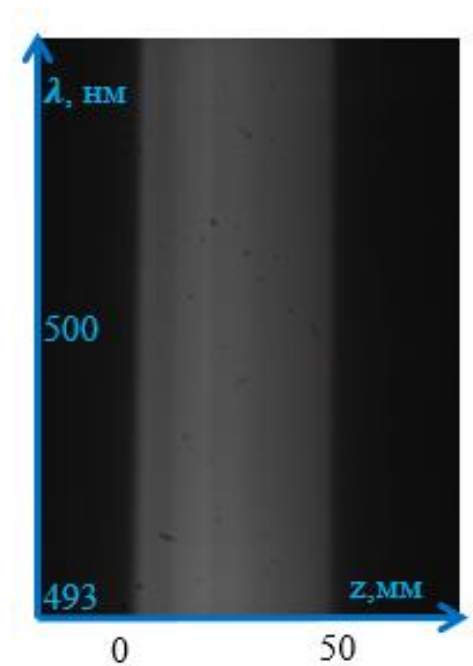


Рис. 10 Непрерывный спектр излучения нагретого катода LaB<sub>6</sub>

Для нахождения пространственного разрешения в математической среде MatLab была построена зависимость интенсивности излучения катода вдоль хорды, проинтегрированное по длинам волн, от координаты с учетом скользящего усреднения по 5 точкам (Рис. 11).

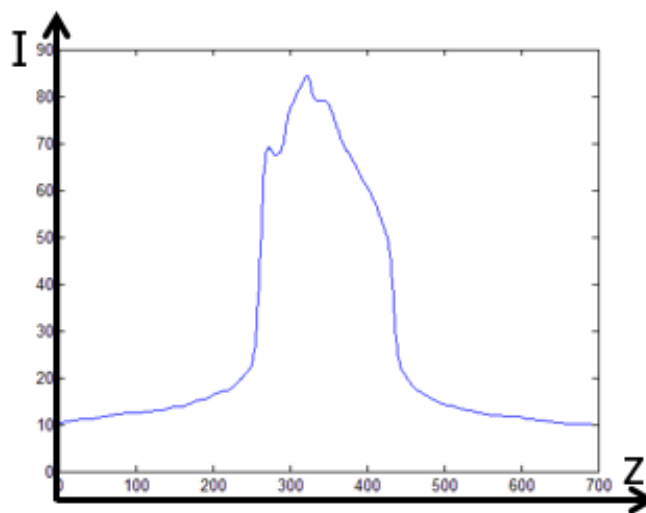


Рис. 11 Интенсивность излучения, проинтегрированное по длинам волн

Затем была вычислена и построена зависимость производной функции  $\frac{dI}{dz}$  от пространственной координаты, представленная на Рис. 12, 13.

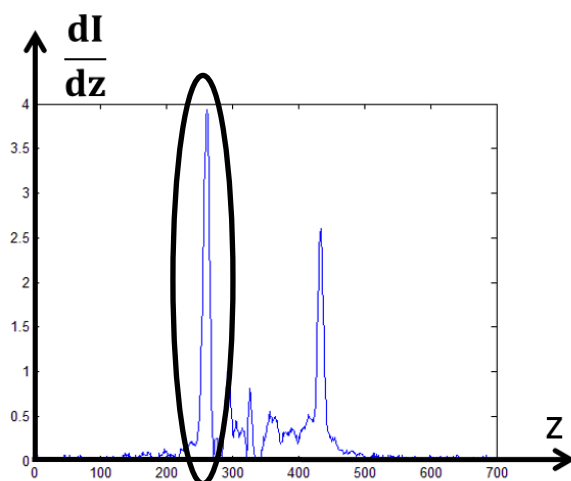


Рис. 12 Производная интенсивности излучения

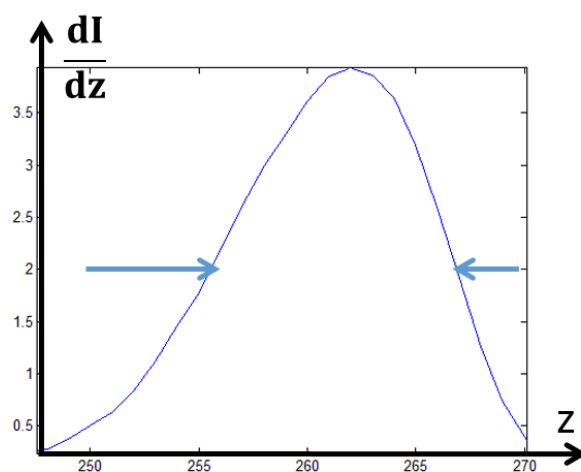


Рис. 13 Производная интенсивности излучения на левой границе спектра

Пространственное разрешение было найдено на границах непрерывного спектра как ширина на полувысоте граничных пиков:

$$R = 10 \text{ px} \approx 1,4 \text{ мм}$$

Необходимо отметить, что полученное пространственное разрешение является оценкой сверху из-за того, что мы наблюдаем интегральную интенсивность свечения хорд, которая может включать в себя не только излучающую часть катода, но и холодный корпус катодной сборки.

Таким образом, зная основные параметры спектрометра, мы можем различать объекты, линейные размеры которых более 1,4 мм, что достаточно для исследования пространственного распределения интенсивности излучения катода диаметром 50 мм или плазменной струи с характерной шириной  $\sim 10$  см, а значит спектральный прибор подходит для изучения свойств плазмы и определения ее параметров, локализованных в пространстве.



## Глава 3. Определение пространственных характеристик плазмы из интегральных соотношений

### 3.1 Постановка задачи. Уравнение Абеля

Наша диагностика позволяет регистрировать хордовое распределение интенсивности на определенной длине волны [9]. В отсутствие возмущений плазма обладает в расширителях аксиальной симметрией, в центре – винтовой, исходя из этого, наиболее простой и наглядной конфигурацией для решения подобных задач является аксиально симметричная плазменная система. Также изначально предполагается, что пространственное распределение параметра в заданном сечении зависит только от радиуса системы  $r$  и не зависит от угла, так как вращение в первом приближении происходит относительно трехмерной магнитной оси. На Рис. 14 представлена модель решаемой обратной задачи.

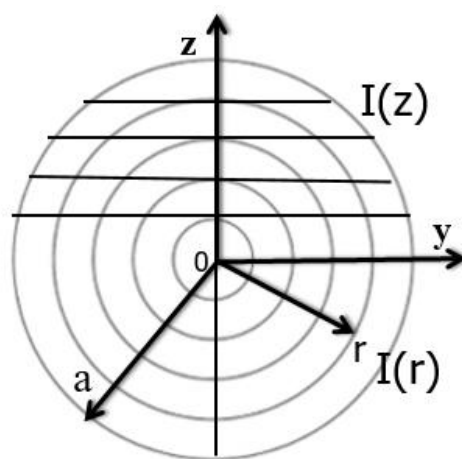


Рис. 14 Определение радиального распределения  $I(r)$  с помощью хордового  $I(z)$

Необходимо, зная измеренную функцию распределения  $I(z)$ , определить пространственное распределение исследуемого параметра. Связь радиального распределения интенсивности  $I(r)$  с регистрируемой величиной  $I(z)$  задается интегральным уравнением Абеля [9]:

$$I(z) = 2 \int_z^a \frac{I(r) \cdot r}{(z^2 - r^2)^{1/2}} dr$$

Решение этого уравнения выглядит следующим образом:

$$I(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^a \frac{I'(z)}{(z^2 - r^2)^{1/2}} dz$$

Точное решение почти не применяется на практике по причине наличия производной  $I'(z)$ , из-за которой решение может иметь огромные погрешности по сравнению с экспериментально полученной зависимостью  $I(z)$  из-за увеличения в десятки раз влияния шумов при дифференцировании. В связи с этим в настоящий момент существует множество различных методов, в том числе и численных, используемых для абелизации.

### ***3.2 Решение уравнения Абеля методом Пирса***

Метод Пирса [10], схема которого представлена на Рис.15, является один из наиболее простых методов решения задачи Абеля. Он заключается в том, что мы разбиваем сечение плазменное на несколько кольцевых зон, а распределение  $I(r)$  аппроксимируем ступенчатой функцией, считая, что данная величина в пространстве, ограниченном кольцами радиусами  $r_j$  и  $r_{j-1}$ , постоянна. Причем, если общее число колец равно  $N$ , то  $r_j - r_{j-1} = a/N$ , где  $a$  – радиус сечения плазмы. Таким образом параллельные хорды делят сечение на  $N$  равных полос.

Регистрируя величину  $I_j(z)$ , мы наблюдаем вклад значений  $I(r)$  от  $I_i$  до  $I_N$  с некоторым коэффициентом  $a_{ij}$ . Эти коэффициенты являются элементами площади, образованными на пересечении  $i$ -ой полосы и  $j$ -ого кольца.



от 1 до 15 % радиальное распределение было восстановлено вновь. Сравнивая первоначальные и конечные данные, было выяснено, что при  $N = 5$  отклонения минимальны.

### 3.3 Проверка применимости метода

Для проверки алгоритма абелизации был восстановлен радиальный профиль свечения пламенной струи установки ГОЛ-3 по фотографии свечения плазмы в видимом свете.

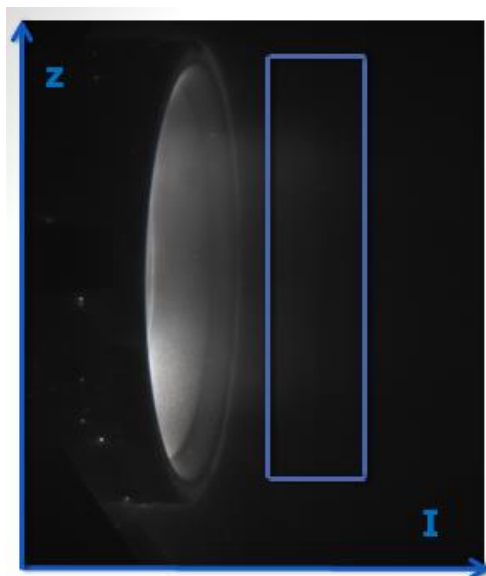


Рис. 16 Фото плазменной струи на установке ГОЛ – 3

Для выделенной области построена хордовая интегральная зависимость свечения (Рис. 17).

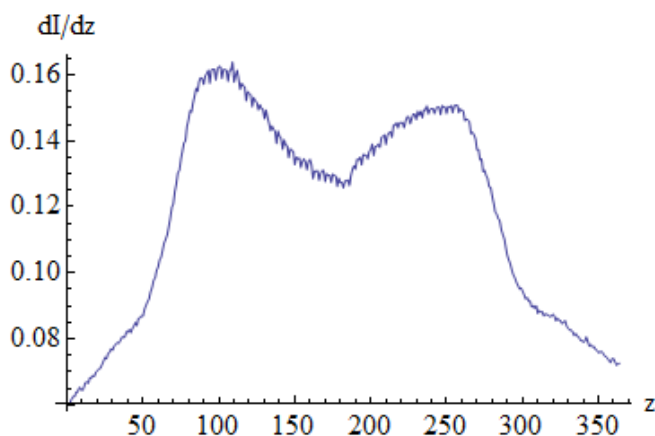


Рис. 17 Интегральная интенсивность свечения

Так как изначально мы предполагаем, что рассматриваемая плазменная конфигурация осесимметрична, то была произведена симметризация графика интенсивности относительно оси (Рис. 18). При таком подходе ошибка будет достаточно малой, потому что различия по интенсивности составляют ~ 5 - 10%, что допустимо при таком методе восстановления радиального распределения.

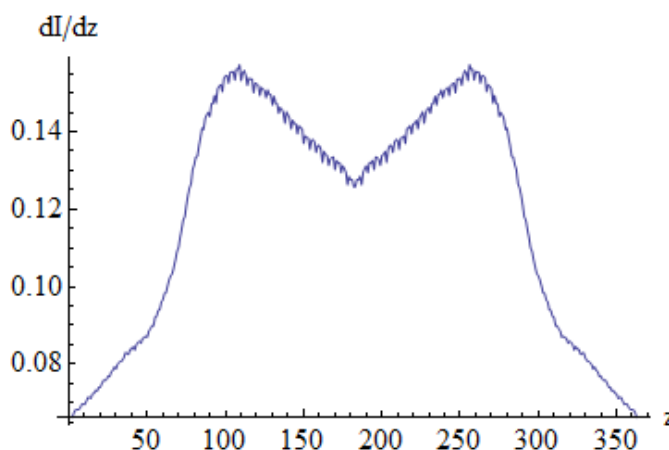


Рис. 18 Симметризованный график интегральной интенсивности свечения

К симметризованной интенсивности свечения был применен метод Пирса для задачи Абея. Результат абелизации показан на Рис. 19.

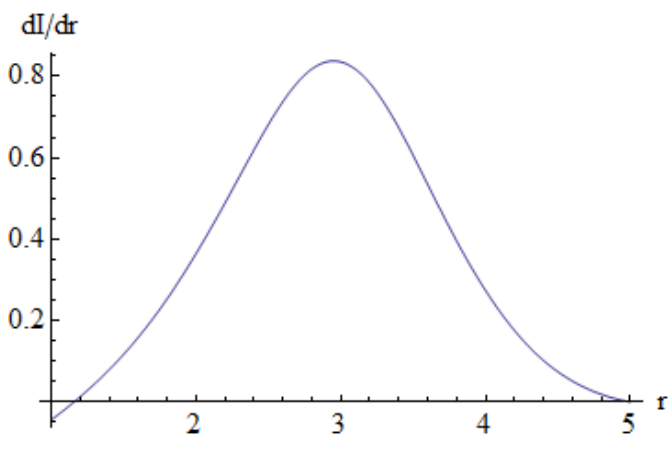


Рис. 19 Интегральная зависимость свечения от радиуса

Исходя из вышеизложенного, такой метод позволяет восстанавливать радиальное распределение свечения плазма, регистрируя хордовое. Для данного примера получена трубообразна форма плазмы с провалом на оси.

## Глава 4. Применение пассивной спектроскопии в экспериментах на установке СМОЛА.

### 4.1 Отработка генерации плазменной струи

На установке СМОЛА проводится отработка режимов генерации плазменной струи штатным источником плазмы с накаливанием магнитоизолированным катодом.

На Рис. 20 показана плазменная струя с наложенными расчетными силовыми линиями магнитного поля, на которой числом обозначен расчетный радиус катода, с которого выходит силовая линия.

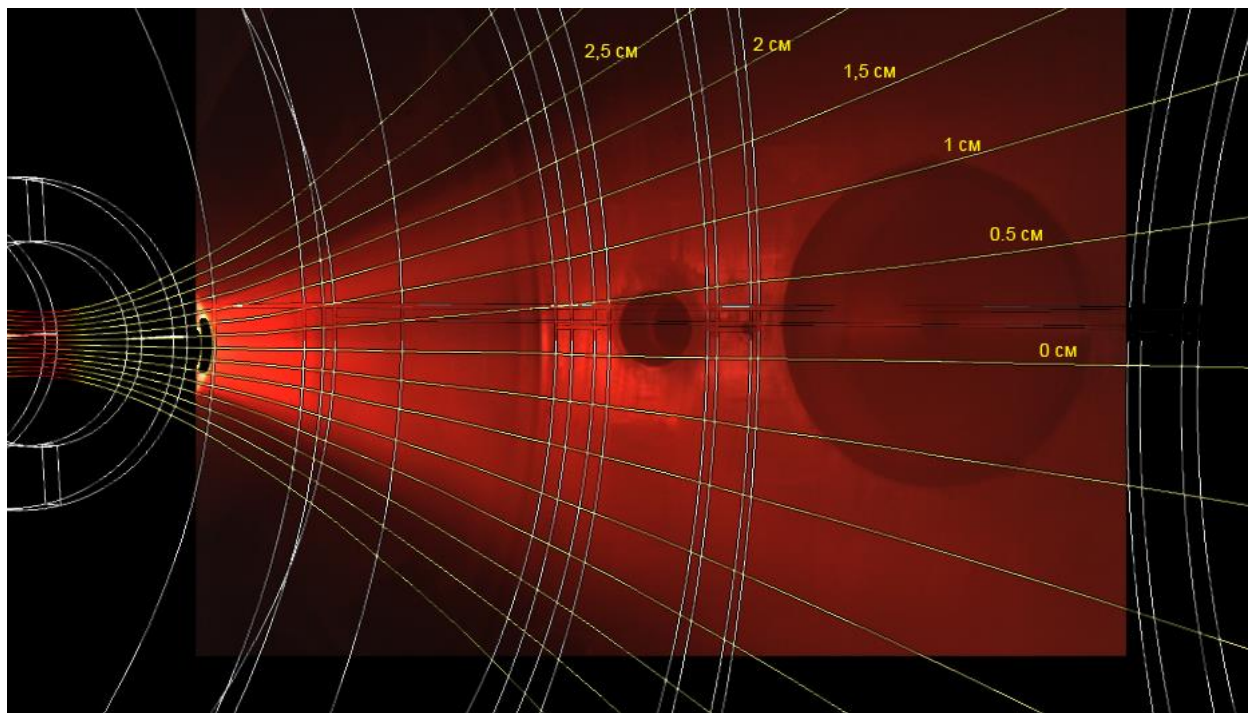


Рис. 20 Плазменная струя с наложенными силовыми линиями магнитного поля

Видно, что плазменный факел движется строго по силовым линиям магнитного поля, опираясь на 4 см радиус катода из 5 см возможных. Указанное различие, по всей видимости, объясняется более низкой температурой края катода и наличием конструктивных элементов катодной сборки, закрывающих эмиссионную поверхность.

Основным рабочим газом для источника плазмы является водород. Существенным недостатком его использования является отсутствие

линейчатого излучения ионов плазмы. Факел низкотемпературной водородной плазмы излучается в линиях  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ , движение которых может существенно отличаться от движения самой плазмы.

Для наблюдения непосредственно ионизированной компоненты плазмы были также проведены эксперименты с гелиевой плазмой, в излучении которой присутствуют спектральные линии водородоподобного иона HeII.

#### ***4.2 Радиальное распределение интенсивности излучения плазменного факела.***

Для восстановления радиального распределения интенсивности свечения плазменной струи были получены изображения линии  $H_{\alpha}$ , каждая из которых была снята в определенном режиме магнитоизоляции катода.

Для проверки работы плазменной пушки при различных значениях ведущего магнитного поля была проведена серия экспериментов с одинаковой конфигурацией, но различной амплитудой магнитного поля. Была использована конфигурация с сильной магнитной изоляцией катода.

На Рис. 21 и 22 изображены спектры свечения плазмы в окрестности линии  $H_{\alpha}$ , снятые в режиме низкого и повышенного магнитного поля соответственно. В режиме низкого поля расчётная величина магнитного поля на аноде составляет 0,06 Тл, поле на катоде составляет 7/8 поля на аноде. В режиме повышенного поля расчётная величина магнитного поля на аноде увеличена до 0,1Тл.



Рис. 21 Спектральная линия  $H_{\alpha}$ , полученная в режиме низкого магнитного поля



Рис. 22 Спектральная линия  $H_{\alpha}$ , полученная в режиме высокого магнитного поля

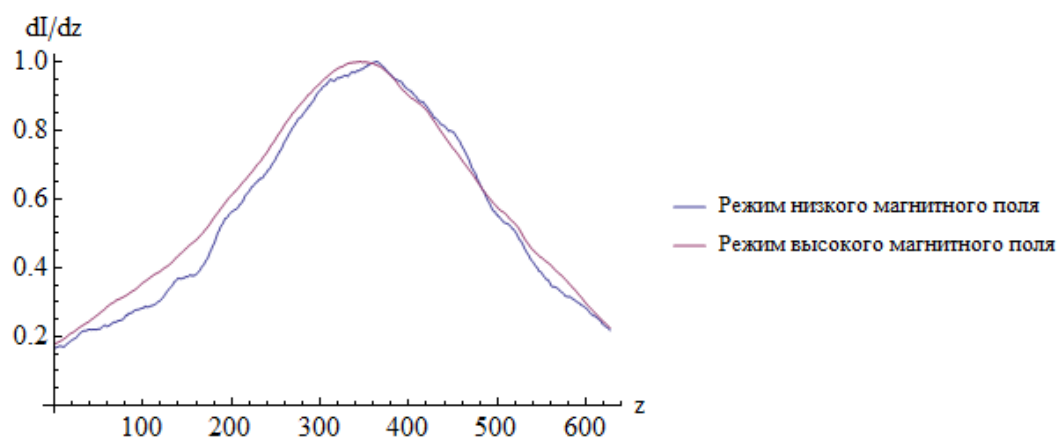


Рис. 23 Нормированная интегральная интенсивность свечения  $H_{\alpha}$



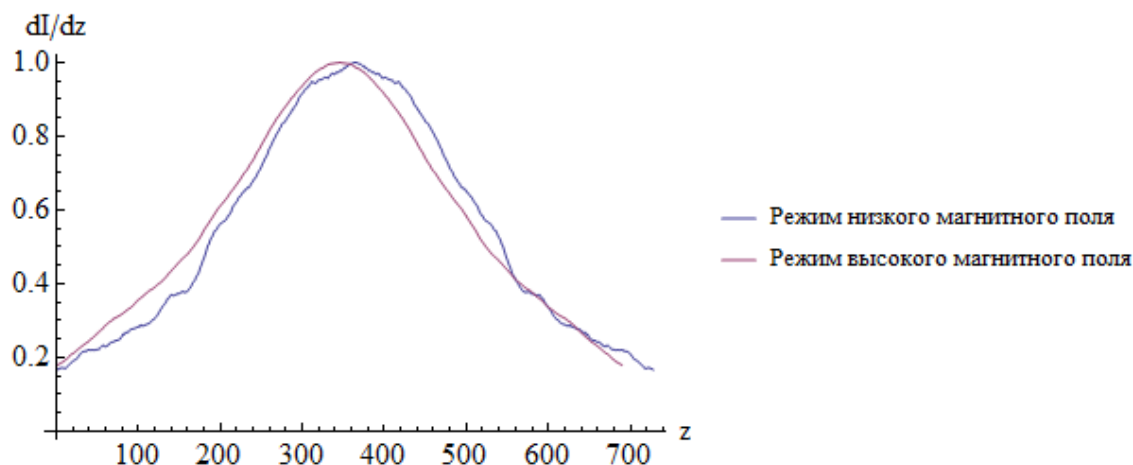


Рис. 24 Симметризованный график интегральной интенсивности свечения  $H_{\alpha}$

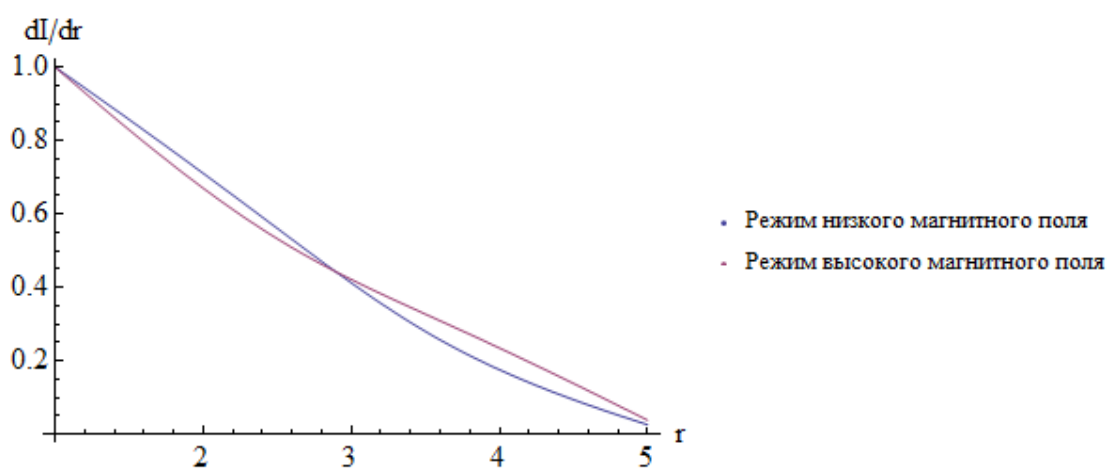


Рис. 25 Восстановленное радиальное распределение интенсивности свечения  $H_{\alpha}$

Рассматривая радиальные распределения интенсивности свечения линий  $H_{\alpha}$ , можно сделать вывод о том, что при изменении напряжений на аноде и катоде, кардинальных различий нет, то есть, работая в разных режимах, плазменный факел имеет колоколообразную форму.

Распределение свечения линии  $HeII$  в экспериментах с гелиевой плазмой приведено на Рис. 26

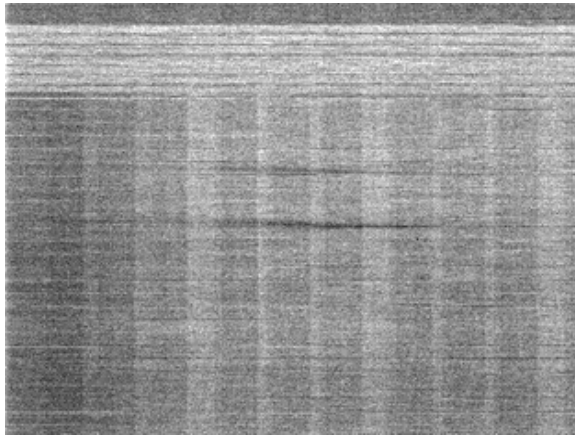


Рис. 26 Спектральные линии ионизированного гелия (нижняя) и примеси плазмы (верхняя)

Сопоставляя такие спектральные линии и  $H_{\alpha}$ , было установлено, что спектральная линия с меньшей длиной волны (нижняя на Рис. 26) соответствует спектральной линии излучения HeII (656,018 нм). Спектральная линия с большей длиной волны (верхняя на Рис. 26), по всей видимости, отвечает примесям.

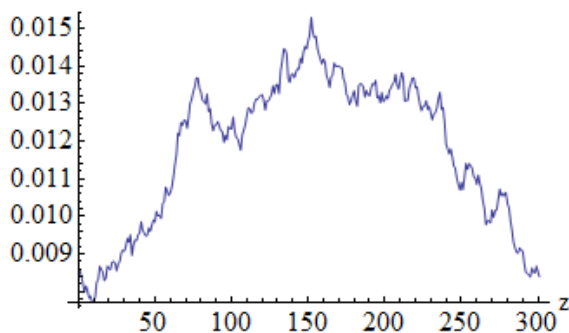


Рис. 27 Интегральная интенсивность свечения HeII

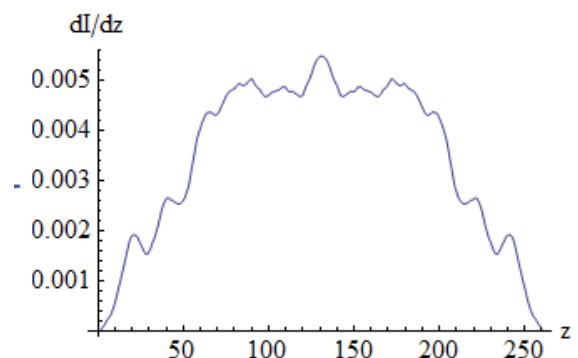


Рис. 28 Симметризованный график интегральной интенсивности свечения HeII

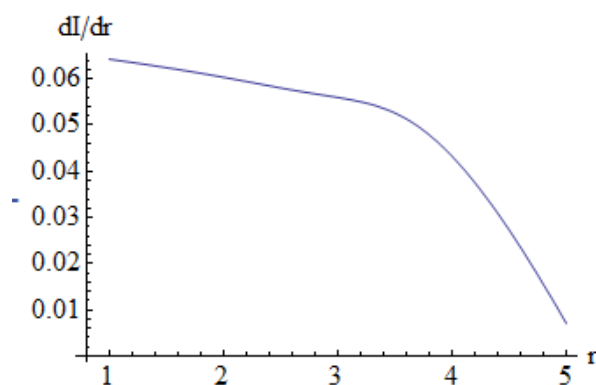


Рис. 29 Восстановленное радиальное распределение интенсивности свечения HeII

Было показано наличие вне объёма плазменной пушки ионизированной компоненты. По сравнению с водородной распределение гелиевой плазмы представляет собой на данной фазе разряда почти плоское свечение, вследствие чего спад радиальной интенсивности происходит медленнее, чем в предыдущем случае. Различия в распределении объясняются затруднённым протеканием разряда в гелии, что подтверждается, в том числе, существенным (до 5 раз) падением разрядного тока.

### ***4.3 Определение скорости плазмы по доплеровскому сдвигу***

Спектральная линия  $H_{\alpha}$  излучения плазменной струи (Рис. 21) имеет заметный наклон относительно калибровочной линии (Рис. 6) – розовая линия на Рис.30, что свидетельствует о наличии вращения.

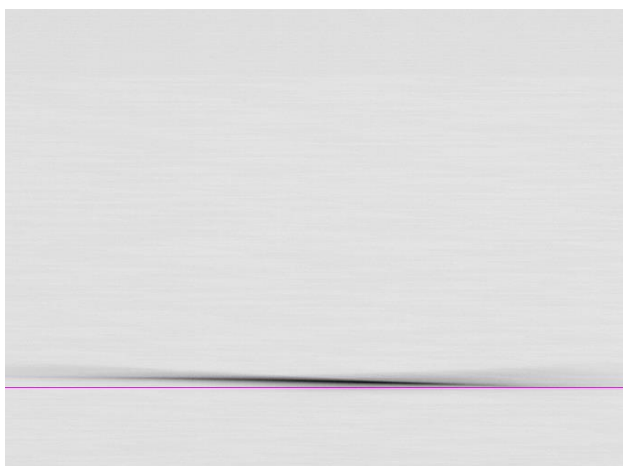


Рис. 30 Спектральная линия  $H_{\alpha}$

Связь линейной скорости  $v$ , скорости вращения  $\omega$  и расстояния до центра вращения  $R$  даёт следующая формула:

$$v = \omega \cdot R$$

Аппроксимируя спектральную линию прямой, был определен угловой коэффициент  $k = 0,022$ . На расстоянии  $\sim 2$  см (140 px) от оси доплеровский сдвиг линии составляет  $\delta\lambda = 3$  px  $\approx 0,075$  нм. В таком случае линейная скорость равна:

$$v = \frac{\delta\lambda}{\lambda} c = \approx 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$$

Тогда угловая скорость:

$$\omega \approx 10^6 \text{ с}^{-1}$$

Данная скорость является, строго говоря, скоростью вращения нейтральных атомов. В то же время в сильно разряженном газе наличие регулярного кругового движения нейтральных атомов может быть объяснено только вращением ионов до их нейтрализации.

Магнитное поле в области наблюдения может быть оценено как  $\sim 0,1$  величины магнитного поля в области анода. Указанная угловая скорость при этом соответствует наличию радиального электрического поля  $\sim 100 \text{ В/см}$ .

## Заключение

В результате проделанной работы сконструирован спектрометр с пространственным разрешением  $R \approx 1,4$  мм и шириной аппаратной функции  $\beta \approx 0,1$  нм, что позволяет диагностировать скорость плазменной струи с точностью до  $\sim 10^6$  см/с.

Разработано математическое обеспечение для обработки изображений плазменной струи и восстановления радиального профиля свечения плазмы путем абелизации методом Пирса, определены оптимальные параметры для его реализации.

Получены радиальные распределения интенсивности линий  $H_\alpha$  и ионизированного HeII в плазменной струе установки СМОЛА.

По радиальному распределению доплеровского сдвига линии  $H_\alpha$  рассчитана скорость движения нейтрального водорода, дающая оценку угловой скорости плазмы  $\omega \approx 10^6$  с<sup>-1</sup>.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю Судникову А. В. за терпение, организацию процесса и неоценимое участие при выполнении данной работы. Отдельно хочется поблагодарить заведующего лабораторией 10 ИЯФ СО РАН Бурдакова А. В., на всем протяжении работы проявлявшему должное внимание к данной теме, Иванову И. А. – за научное сотрудничество и своевременные замечания, Красулину А. Н. – за консультации в разделах дискретной математики и обработки данных, Куклина К. Н. - за поддержание работоспособности установки, а также всех тех, кто принимал участие в работе.

## Список литературы

1. International Energy Agency, *World Energy Outlook*, (2010).
2. K. Ikeda, *Nuclear Fusion*, **47**, 6 (2007).
3. N. Rostoker et al., *J. Fusion Energy*, **22** (2), 83 (2003).
4. A. D. Beklemishev, *Fusion Sci. Technol*, **63** (No. 1T), 355 (2013).
5. V. V. Postupaev et al., *Fusion Eng. Design*, **106**, 29 (2016).
6. A.V. Sudnikov et al., *AIP conference proceedings*, (2016).
7. T. Akhmetov et al., *Rev. sci. instr.*, **87**, 106 (2016).
8. И. А. Иванов, А. В. Бурдаков, А. Ф. Ровенских, Е. Н. Сидоров, *Приборы и техника эксперимента*, №2, 100-105 (2016).
9. Э. И. Кузнецов, Д. А. Щеглов Методы диагностики высокотемпературной плазмы, *Атомиздат*, 6 – 29 (1974).
10. У. Д. Пирс Получение и исследование высокотемпературной плазмы, *Изд-во иностр. лит.*, 221 (1962).