

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра
Кафедра физики плазмы**

Калабаев Евгений Николаевич

Название работы

Определение профиля плотности, состава и угловой расходимости атомарного пучка методом доплеровской спектроскопии

Научный руководитель:

П. П. Дейчули,

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск – 2006 год

Оглавление

Введение -----	3
1. Схема экспериментальной установки и устройство регистрирующих узлов ----	4
2. Спектроскопическая диагностика параметров атомарного пучка -----	7
2.1. Определение состава пучка по соотношению интенсивностей спектральных линий-----	7
2.2. Определение профиля плотности-----	11
2.3. Определение угловой расходимости-----	12
2.4. Обсуждение экспериментальных результатов-----	13
3. Возможные способы модернизации методики -----	16
4. Сравнение метода диагностики с другими методиками -----	17
Заключение -----	18
Литература -----	19

Введение

Одним из методов диагностики плазмы в современных термоядерных установках является метод инжекции нейтральных пучков в плазму. Для реализации такой диагностики требуется инжектор атомов водорода с энергией порядка 50 кэВ. Основными параметрами такого пучка являются состав и угловая расходимость.

Состав пучка - это содержание атомов в пучке с энергией E , $E/2$, $E/3$. Ионный источник инжектора генерирует ионы H^+ , H_2^+ , H_3^+ , которые ускоряются до одинаковых энергий $E = eU$. Затем, в процессе нейтрализации образуются атомы с различной энергией. Наличие групп частиц разных энергий обычно нежелательно, так как усложняет обработку экспериментальных данных, поэтому стремятся максимально увеличить содержание атомов полной энергии.

Угловая расходимость пучка определяет возможность его транспортировки на большие расстояния и возможность фокусировки. В диагностических целях желательно иметь минимальный размер пучка, отсюда требование к минимизации угловой расходимости. Угловая расходимость зависит от конфигурации инжектора: источника ионов, устройство ускоряющих решеток.

Эти два параметра - угловую расходимость и состав пучка важно точно определять в процессе наладки инжектора. В силу нейтральности и высокой плотностью мощности в пучке, задача является довольно трудной, поэтому актуальным становится бесконтактный метод диагностики, основанный на регистрации излучения с длиной волны, смещенной вследствие эффекта Доплера.

В данной работе используется бесконтактный оптический метод: при наблюдении излучения, порожденного взаимодействием пучка с остаточным газом вакуумной камеры, под углом, группы атомов с разными скоростями образуют разделенные по длине волны спектральные линии.

Целью работы является выработка алгоритма определения процентного состава, профиля плотности и угловой расходимости по экспериментальным спектрограммам. Написание программ обрабатывающих спектрограммы

1. Схема экспериментальной установки и устройство регистрирующих узлов

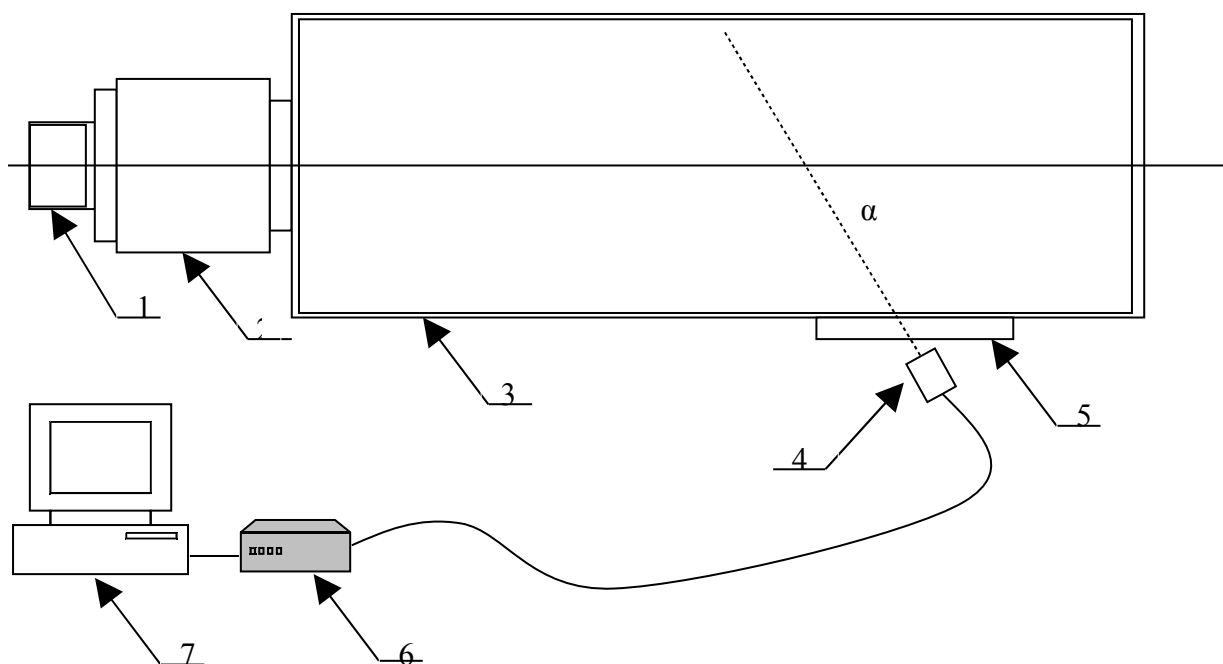


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Установка (Рис. 1) включает в себя инжектор нейтральных частиц: ионный источник (1) создает плазму, из которой вытягиваются ионы и ускоряются системой сеток создающих электростатическое поле, быстрые ионы попадают в перезарядную камеру (2) и частично нейтрализуются. Далее пучок попадает в вакуумную камеру (3), при взаимодействии пучка с остаточным газом камеры излучается свет, который через иллюминатор (5) регистрируется оптической системой (4) состоящей из объектива на передвижной платформе, позволяющей перемещать объектив по вертикали и вращать в горизонтальной плоскости, меняя угол наблюдения пучка. Излучение по оптическому проводу передается в спектрометр HR2000 (6). Спектрометр аккумулирует излучение заданное время и передает в компьютер (7) массив данных со спектром. Специальная программа отображает спектр и позволяет сохранить его на диск.

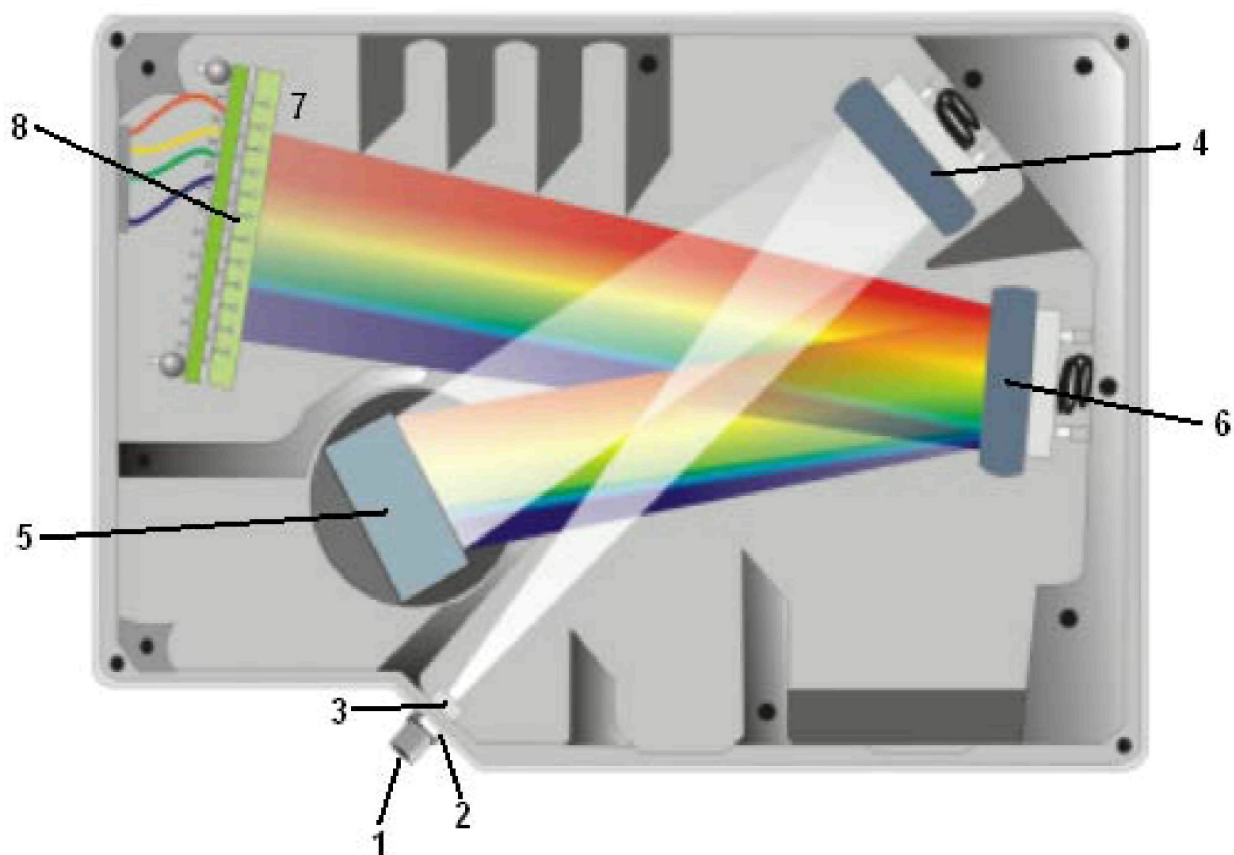


Рис. 2 Схема спектрометра HR2000

Описание элементов спектрометра:

1 – разъем для оптоволоконного кабеля;

2 - щель, регулирующая количество проникающего света в спектрометр и разрешение спектрометра;

3 - оптический фильтр, пропускающий свет в рабочем диапазоне длин волн от 600нм до 700нм;

4 - собирающее зеркало;

5 - дифракционная решетка;

6 - фокусирующее зеркало;

7 – микролинзы фокусирующие излучение на чувствительные элементы CCD матрицы

8 – CCD матрица

Разрешающая способность спектрометра 0.4 нм. Минимальное время экспозиции 3 мс.

Спектрометр соединяется с компьютером посредством USB порта,

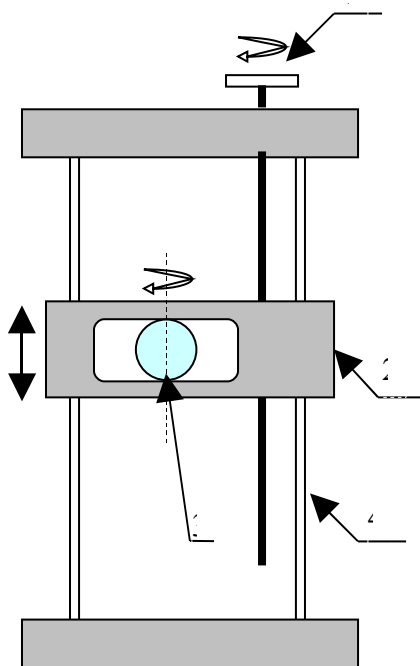


Рис. 3 Схема механизма перемещения оптической системы.

Для точного позиционирования объектива необходим механизм прецизионного плоскопараллельного перемещения. Сконструирована и изготовлена подвижка, позволяющая перемещать объектив (Рис. 3).

Объектив (3) крепится на подвижную платформу (2) так, чтобы можно было вращать объектив в горизонтальной плоскости. Платформа скользит по направляющим (4), вертикальное перемещение платформы обеспечивается винтом (1).

Объектив – фотографический объектив Юпитер-3 (фокусное расстояние 50мм, светосила 1.5) собирает свет на вход оптоволоконного кабеля, диаметр входного отверстия кабеля 0.2 мм, что позволяет свести характерный диаметр области светосбора до 1 см.

2. Спектроскопическая диагностика параметров атомарного пучка

2.1 Определение состава пучка по соотношению интенсивностей спектральных линий

Ионы, образовавшиеся в ионном источнике, ускоряются и пролетают водородную мишень, в которой происходит перезарядка ионов. На Рис. 4 представлен процент выхода восстановленных атомов Н при равновесной мишени в зависимости от энергии.

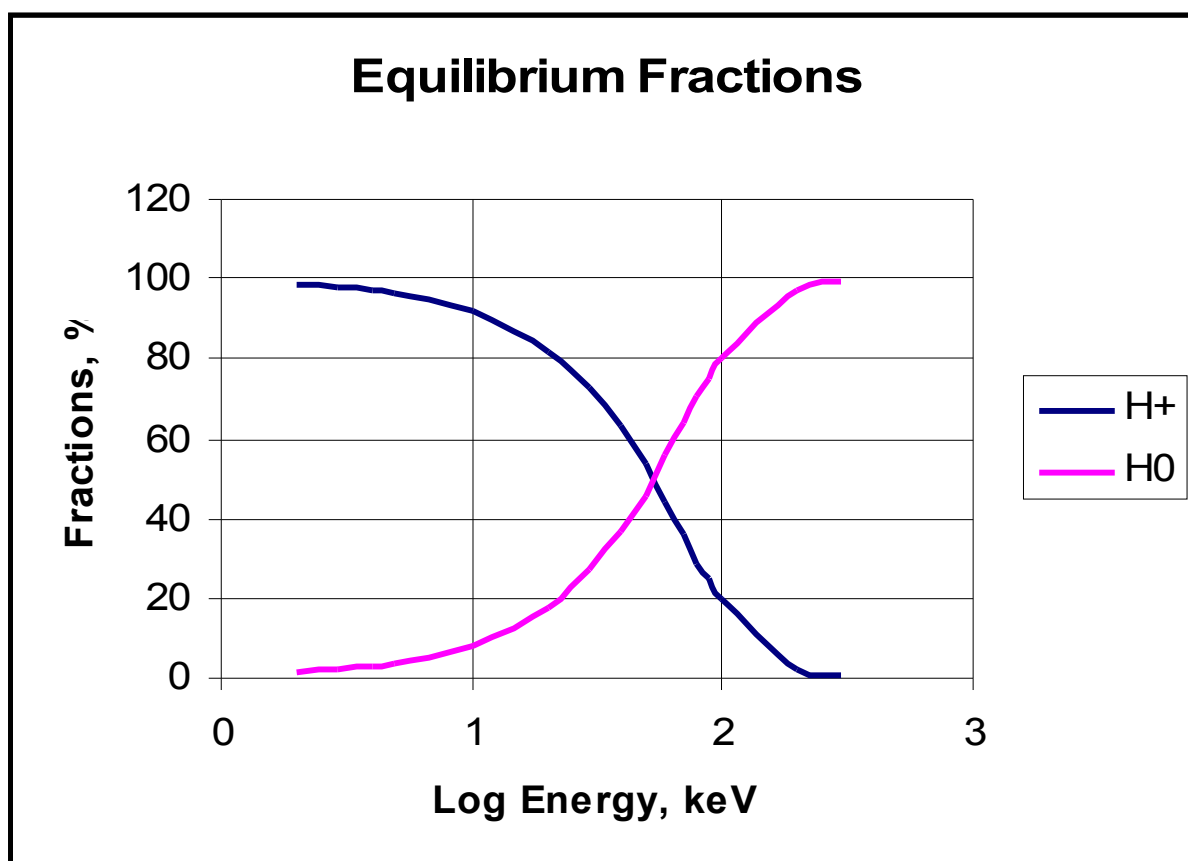
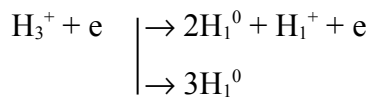
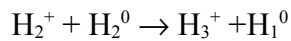
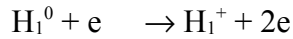
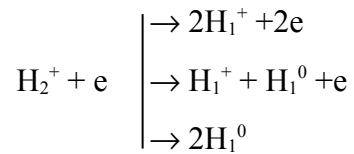
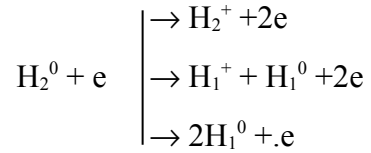


Рис. 4 Равновесные фракции при прохождении водородного пучка через мишень H₂.

Для энергии 50 кэВ выход составляет около 50%. Остаточные ионы отклоняются магнитным полем, и быстрый пучок нейтральных частиц попадает в вакуумную камеру. В перезарядной камере атомы сильно возбуждаются и излучают, всевозможные возбуждения атомов релаксируют на пути около 50 - 100 см. после перезарядной камеры при энергии атомов 50 кэВ. Дальше излучение пучка переходит в стационарную фазу. Оптическая система регистрирует излучение пучка, рассеянный и отраженный стенками вакуумной камеры свет – паразитный, также попадает в область

светосбора. Численным расчетом было получено, что паразитное излучение составляет доли процента от полезного сигнала.

Во время газового разряда в ионном источнике происходят процессы, в которых образуются ионы H^+ , H_2^+ , H_3^+ :



Соотношение H^+ , H_2^+ , H_3^+ зависит от многих параметров, таких как геометрия камеры источника, напряжение и ток дуги, давление в источнике.

Ионы вытягиваются с поверхности плазмы, попадают в ионнооптическую систему, где ускоряются до одинаковой энергии $E=eU$ и формируются в пучок. Проходя через нейтрализатор, частицы пучка взаимодействуют с фоновым газом H_2 и в результате процессов перезарядки, диссоциации и ионизации образуются 14 видов частиц – ионы и атомы с энергией E , $2E/3$, $E/2$, $E/3$:

$H^+(E)$, $H^0(E)$, $H^-(E)$ из ионов H^+

$H^+(E/2)$, $H^0(E/2)$, $H^-(E/2)$, $H_2^+(E)$, $H_2^0(E)$ из ионов H_2^+

$H^+(E/3)$, $H^0(E/3)$, $H^-(E/3)$, $H_2^+(2E/3)$, $H_2^0(2E/3)$, $H_3^+(E)$ из ионов H_3^+

С помощью магнитного поля ионы отклоняются, и остается пучок, состоящий из фракций нейтральных частиц с энергией E , $E/2$, $E/3$.

Для определения параметров пучка используют газовую мишень. При взаимодействии с мишенью (H_2) частицы пучка излучают линию H_a . Так как излучение регистрируется под углом к оси направления пучка, то согласно эффекту Доплера спектральная линия смещается на величину $\Delta \lambda = \lambda_0 \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos(\alpha)$, где λ_0 - несмещенная длина волны, α - угол между направлением скорости и вектором наблюдения.

Каждой фракции частиц соответствует своя доплеровски смещенная спектральная линия, т.е. при регистрации излучения под неперпендикулярным углом различаются 4 линии. Спектральная линия, соответствующая энергии E , будет сильнее удалена от несмещенной линии, излучаемой фоновым газом, а линии соответствующие энергиям $E/2$ и $E/3$ находятся между ними.

При прохождении пучком единицы длины количество радиационных переходов с единицы объёма - $R_i = \sigma_i n_i n_{H_2}$, где n_{H_2} концентрация фонового газа; n_i , σ_i концентрация и сечение возбуждения i -той фракции пучка. Для линий соответствующих энергиям E , $E/2$, $E/3$ нужно просуммировать R по всем дающим вклад фракциям:

$$R(E) = n_{H_2} \left[\sigma_1^0(E) n_{H^0}(E) + \sigma_1^+(E) n_{H^+}(E) + \sigma_1^-(E) n_{H^-}(E) \right]$$

$$R\left(\frac{E}{2}\right) = n_{H_2} \left[\sigma_1^0\left(\frac{E}{2}\right) n_{H^0}\left(\frac{E}{2}\right) + \sigma_1^+\left(\frac{E}{2}\right) n_{H^+}\left(\frac{E}{2}\right) + \sigma_1^-\left(\frac{E}{2}\right) n_{H^-}\left(\frac{E}{2}\right) + \sigma_2^0(E) n_{H_2^0}(E) + \sigma_2^+(E) n_{H_2^+}(E) \right]$$

$$R\left(\frac{E}{3}\right) = n_{H_2} \left[\sigma_1^0\left(\frac{E}{3}\right) n_{H^0}\left(\frac{E}{3}\right) + \sigma_1^+\left(\frac{E}{3}\right) n_{H^+}\left(\frac{E}{3}\right) + \sigma_1^-\left(\frac{E}{3}\right) n_{H^-}\left(\frac{E}{3}\right) + \sigma_3^+(E) n_{H_3^+}(E) + \sigma_2^0\left(\frac{2E}{3}\right) n_{H_2^0}\left(\frac{2E}{3}\right) + \sigma_2^+\left(\frac{2E}{3}\right) n_{H_2^+}\left(\frac{2E}{3}\right) \right]$$

Индексы у сечений означают: нижний – число атомов в быстрой частице, верхний – её заряд.

Введем обозначения:

$$f_1^0(E) = \frac{n_{H^0}(E)}{H^+}; \quad f_1^0(E/2) = \frac{n_{H^0}(E/2)}{H_2^+}; \quad f_1^-(E) = \frac{n_{H^-}(E)}{H^+}$$

где H_i^+ - концентрация i -той фракции пучка до входа в нейтрализатор. Введем коэффициенты C_i - связывающие отношение концентраций и отношение

интенсивностей излучения: $\frac{H_i^+}{H^+} = C_i \left[\frac{R(E/i)}{R(E)} \right]$

$$C_2 = \frac{\sigma_1^0(E)f_1^0(E) + \sigma_1^+(E)f_1^+(E) + \sigma_1^-(E)f_1^-(E)}{\sigma_1^0(\frac{E}{2})f_1^0(\frac{E}{2}) + \sigma_1^+(\frac{E}{2})f_1^+(\frac{E}{2}) + \sigma_1^-(\frac{E}{2})f_1^-(\frac{E}{2}) + \sigma_2^0(E)f_2^0(E) + \sigma_2^+(E)f_2^+(E)};$$

$$C_3 = \frac{\sigma_1^0(E)f_1^0(E) + \sigma_1^+(E)f_1^+(E) + \sigma_1^-(E)f_1^-(E)}{\sigma_1^0(\frac{E}{3})f_1^0(\frac{E}{3}) + \sigma_1^+(\frac{E}{3})f_1^+(\frac{E}{3}) + \sigma_1^-(\frac{E}{3})f_1^-(\frac{E}{3}) + \sigma_3^+(E)f_3^+(E) + \sigma_2^0(\frac{2E}{3})f_2^0(\frac{2E}{3}) + \sigma_2^+(\frac{2E}{3})f_2^+(\frac{2E}{3})}$$

При использовании отклоняющих магнитов, заряженные частицы покидают пучок и выражения для C_2 , C_3 принимают более простой вид:

$$C_{20} = \frac{\sigma_1^0(E)f_1^0(E)}{\sigma_1^0(\frac{E}{2})f_1^0(\frac{E}{2}) + \sigma_2^0(E)f_2^0(E)}; \quad C_{30} = \frac{\sigma_1^0(E)f_1^0(E)}{\sigma_1^0(\frac{E}{3})f_1^0(\frac{E}{3}) + \sigma_2^0(\frac{2E}{3})f_2^0(\frac{2E}{3})};$$

По отношению интенсивностей спектральных линий можно оценить соотношение между концентрациями фракций H^+ : H_2^+ : H_3^+ . Оно выражается следующими формулами:

с отклоняющим магнитом:

$$\frac{H_2^+}{H^+} = C_{20} \left[\frac{R(E/2)}{R(E)} \right]; \quad \frac{H_3^+}{H^+} = C_{30} \left[\frac{R(E/3)}{R(E)} \right];$$

без отклоняющего магнита:

$$\frac{H_2^+}{H^+} = C_2 \left[\frac{R(E/2)}{R(E)} \right]; \quad \frac{H_3^+}{H^+} = C_3 \left[\frac{R(E/3)}{R(E)} \right];$$

Коэффициенты C_2 и C_3 , были рассчитаны для различных энергий и толщины перезарядной мишени. Эти зависимости приведены в работе [1]. Данная модель излучения не имеет всеобщей применимости, но сравнение результатов полученных этой методикой с результатами, полученными магнитным масс анализатором позволяет считать данную теорию излучения применимой в исследуемых инжекторах.

2.2 Определение профиля плотности

Ионнооптическая система инжектора на выходе представляет из себя излучающую быстрые ионы поверхность, каждую точку которой можно считать источником микропучка с какой-то угловой расходимостью. Удаляясь от ионнооптической системы, линейный профиль пучка расплывается и описывается гауссовой функцией: $n_a \propto e^{-\alpha(z)r^2}$, где r – расстояние от оси пучка, z – расстояние от ионнооптической системы.

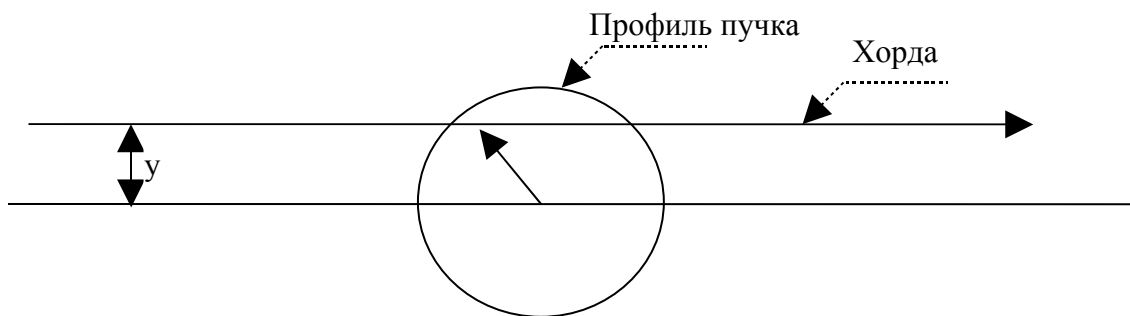
Рассмотрим зависимость интенсивности регистрируемого света при поперечном сканировании.

Излучение единицы объема моноэнергетического пучка-

$$dI \propto n_0 \cdot n_a \cdot dV, \text{ где } n_0 - \text{плотность остаточного газа в камере, } n_a -$$

плотность атомов в пучке. n_0 считаем независимым от плотности потока частиц пучка, т.е. $n_0 = \text{const}$ (эмпирической проверкой этого факта является пропорциональное увеличение интенсивности света в зависимости от тока пучка).

Воспользуемся предположением, что $n_a \propto e^{-\alpha \cdot r^2}$



При бесконечно малом сечении области наблюдения получается:

$$I(y) \propto e^{-\alpha \cdot y^2}$$

В нашем случае оптическая система имеет сечение наблюдаемой области около $s=1$ см², и функция интенсивности при условии, что определено положение объектива, когда он направлен на ось пучка и характерным радиусом пучка 4 - 5 см, получается:

$$I(y) \propto f(s, y) \cdot e^{-\alpha \cdot y^2}$$

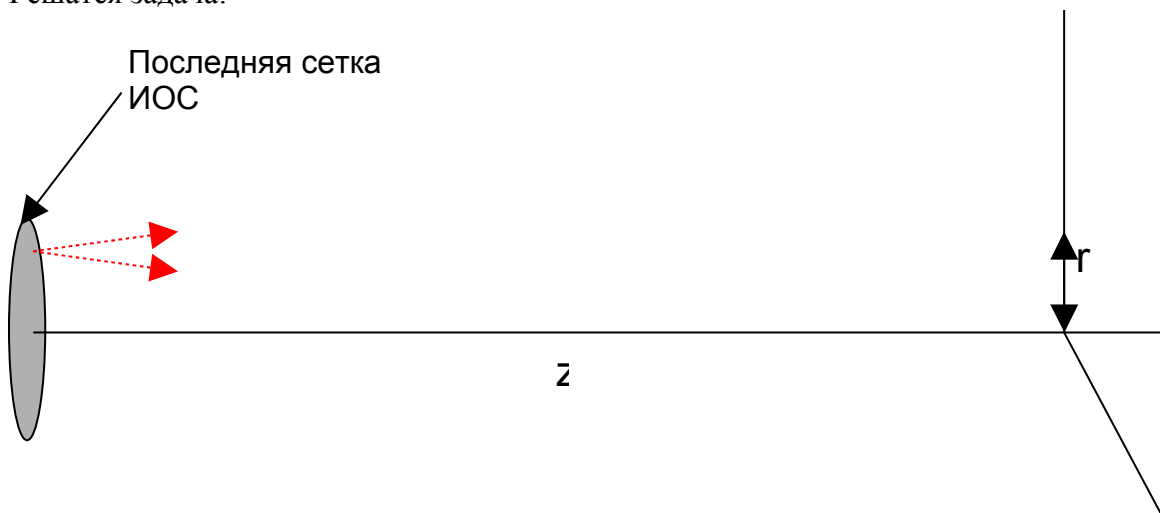
Численные расчеты показывают, что в зависимости от y при данном s и при данном размере пучка

$$f(y) = 1 \pm 0.03$$

Таким образом, профиль интенсивности регистрируемого сигнала при поперечном сканировании совпадает с хорошей точностью с профилем плотности при $n_a \propto e^{-\alpha \cdot r^2}$.

2.3 Определение угловой расходимости

Решается задача:



На выходе ионнооптической системы (ИОС) имеется плотность тока

$$di(\vec{r}, \alpha) = di_0 \cdot e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^2};$$

где α_0 - угловая расходимость, α – угол между перпендикуляром к плоскости ИОС и направлением излучения, вектор \vec{r} – координата точки на поверхности ИОС.

Требуется определить плотность тока в плоскости перпендикулярной оси пучка на расстоянии z – от поверхности ИОС

$$n(\vec{r}, z)$$

Численным интегрированием по всей поверхности эммитера определяем расчетный профиль плотности, и методом вариации α_0 добиваемся соответствия расчетного $n(\vec{r}, z)$ экспериментально измеренному профилю.

2.4 Обсуждение экспериментальных результатов

В результате проведения экспериментов записывается серия спектрограмм, пример спектрограммы приведен на Рис. 5.

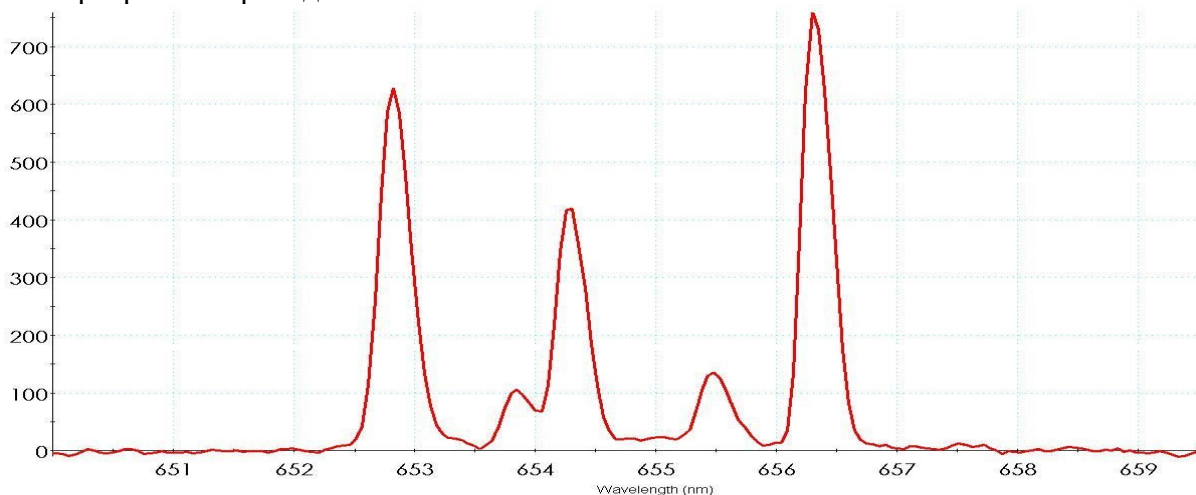


Рис. 5 Спектр излучения пучка

На спектрограмме видны 5 пиков, длине волны 656.3 нм соответствует несмещенная линия H_α , излучаемая остаточным газом вакуумной камеры. Дальше по мере удаления от несмещенной линии идут линии соответствующие энергиям E/18 - вода, E/3 – H_3 , E/2 – H_2 , E – H. Написано программное обеспечение, которое делает первичную обработку спектров, выдавая интенсивности каждой фракции и состав пучка.

Диагностике подвергались два инжектора:

1. диагностический инжектор (ток 3 А, длительность 2 сек, энергия 50 кэВ)
2. мощный нагревной инжектор (ток 55 А, длительность 5 мс, энергия 25 кэВ)

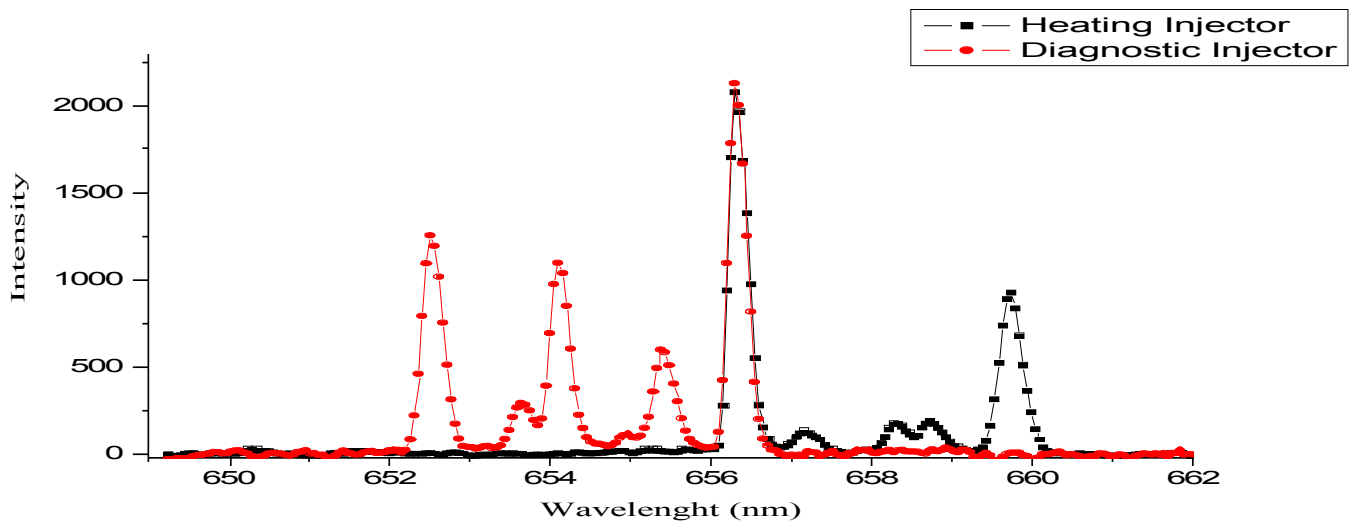


Рис. 6 Сравнение спектров пучков диагностического и нагревного инжекторов
 На Рис. 6 приведены спектры пучков обоих инжекторов. Видно, что в нагревном инжекторе, где ток ионного источника на порядок больше – большая часть ионов распадается до H^+ , и процент выхода основной компоненты максимален.
 Для обоих инжекторов определялись оптимальные параметры, при которых минимальна угловая расходимость и максимален выход основной компоненты (H с полной энергией).

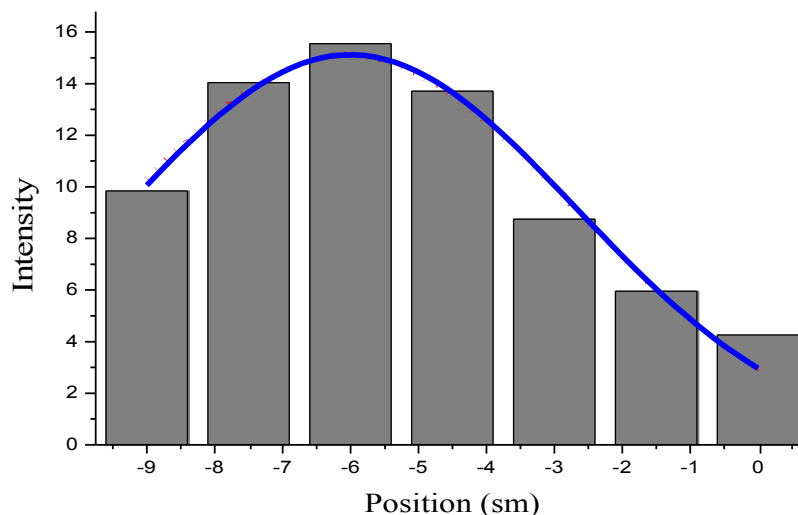


Рис. 7 Пример аппроксимации профиля интенсивности

Процедура проведения эксперимента такова: юстировка – определения положения объектива, когда он направлен на ось пучка (производится как по геометрическим соображениям, так и по серии выстрелов, максимизируя амплитуду принимаемого сигнала), регистрация и запись спектров в позиции, когда объектив направлен на ось

пучка и в 3-4 см от позиции соответствующей оси пучка. Определение положения оси пучка позволяет свести к минимуму влияние аппаратной пространственной функции оптической системы. На Рис. 7 показан пример аппроксимации экспериментального профиля. Повторяемость амплитуды сигнала при одних и тех же параметрах инжектора составляет 10%, серия из 3 измерений позволяет снизить общую погрешность определения профиля плотности и угловой расходимости пучка до 10% и погрешность определения процентного состава до 7%.

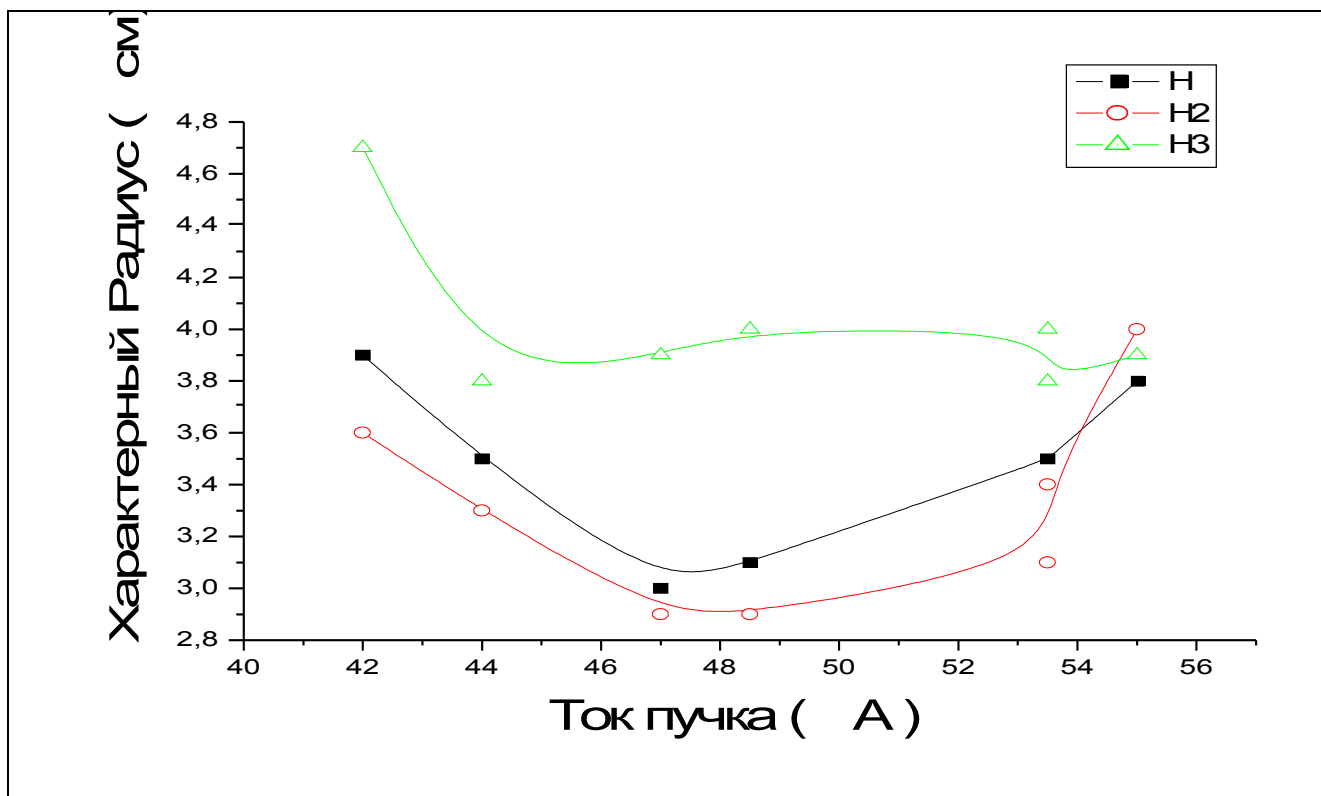


Рис. 8 Зависимость характерного радиуса пучка нагревного инжектора в зависимости от тока.

Измеренное содержание молекулярных фракций: $n(H) = 90\%$; $n(H_2) = 6\%$; $n(H_3) = 3\%$

Угловая расходимость основной компоненты при оптимальных параметрах инжектора: 12.8 ± 1.2 мрад.

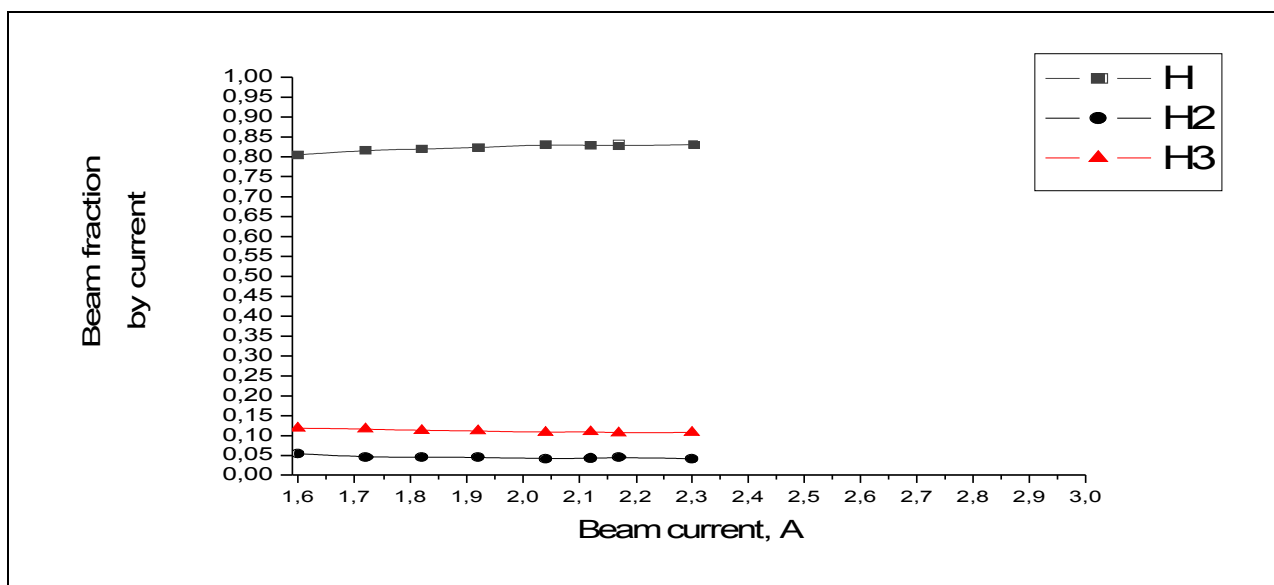


Рис. 9 Зависимость процентного состава пучка диагностического инжектора в зависимости от тока
Измеренное содержание молекулярных фракций: $n(H) = 84\%$; $n(H_2) = 5\%$; $n(H_3) = 10\%$
Угловая расходимость основной компоненты при оптимальных параметрах инжектора:
 10 ± 1 мрад.

3. Возможные способы модернизации диагностики

При диагностике нагревного инжектора возникала проблема с недостаточной интенсивностью излучения. Один из путей решения этой проблемы, это увеличить давление в вакуумной камере, что нежелательно для ускоряющей системы инжектора. Другой способ заключается в использовании зеркал. На Рис. 10 изображен симметричный спектр, получившийся при использовании зеркала расположенного перпендикулярно оптической оси объектива.

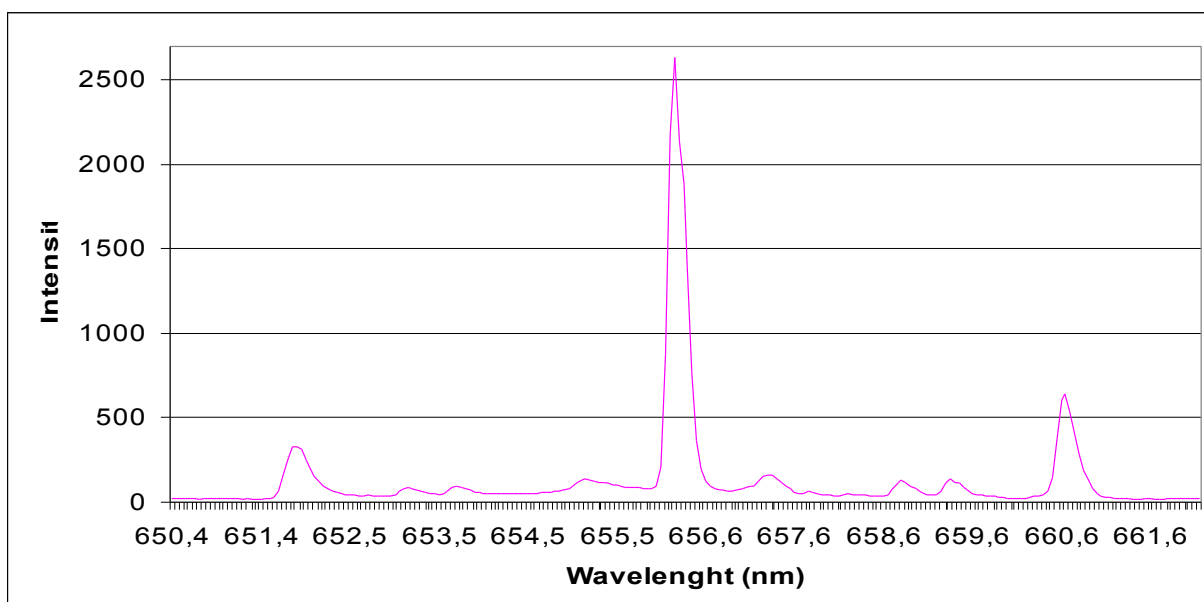


Рис. 10 симметричный спектр

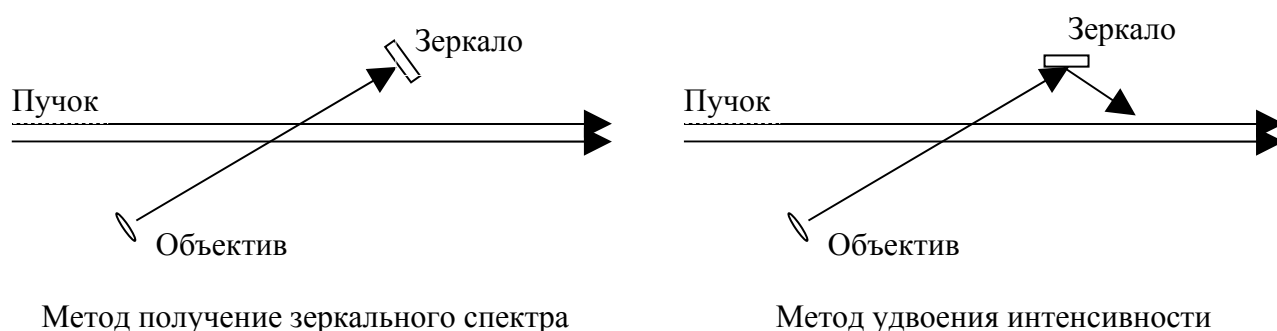


Рис. 11 Схемы с использованием зеркал

На Рис. 11 изображены схемы с использованием зеркал. Метод применим, когда расстояние от зеркала до пучка много меньше расстояния от зеркала до инжектора, т.е. регистрируется излучение с почти одной и той же области. В данной работе зеркала не использовались. Еще один способ увеличения амплитуды сигнала – увеличение диаметра объектива.

Возможна дальнейшая автоматизация диагностики, подключение винта передвижения объектива по вертикали к электроприводу позволит производить эксперимент дистанционно.

Увеличение разрешающей способности спектрометра в 10-20 раз (до 0.02 нм) сделает возможным определять угловую расходимость пучка по единичному спектру, добывая информацию из уширения спектральных линий. Методика подсчета угловой расходимости по одному спектру описана в работах [2] и [3].

4. Сравнение метода диагностики с другими методиками

Один из методов определения профиля плотности – калориметрический, набор термопар регистрирует температуру серии мишеней на пути пучка, простой и надежный метод. Его недостатками является интегральность измеряемых величин и недолговечность деталей попадающих под воздействие пучка, с его помощью можно получить только суммарный профиль всего пучка. Распыление и потери энергии при блистеринге, бурные процессы при сильном прогреве тонкого поверх слоя – причины потерь и расхождения до ~ 2 раз.

Метод на вторичноэмиссионных датчиках – линейка датчиков ставится на пути пучка и регистрируется ток вторичной эмиссии под действием атомов и ионов пучка в цепи датчика пропорциональный падающему току пучка. Коэффициент пропорциональности сильно меняется от времени, даже в течении одного импульса, поэтому точность измерений низкая, и результат дается интегральным током пучка а не покомпонентно.

Магнитный масс анализатор – определяет процентный состав по энергиям. Профиль плотности пучка такой диагностикой можно определить только с дополнительной модернизацией установки.

Таким образом, главное преимущество разработанной диагностики – покомпонентное определение параметров пучка, прежде всего угловой расходимости фракций. Эта новая информация дает простор для исследований физики формирования нейтральных пучков из многокомпонентной плазмы.

Заключение

- Создана диагностика, которая позволяет с хорошей точностью определять важные характеристики атомарных пучков: радиальный профиль, угловую расходимость и содержание молекулярных фракций.
- Данный метод позволяет измерять параметры пучка по отдельности для каждой компоненты.

- Проведены измерения параметров пучков в процессе создания и настройки 2-секундного диагностического инжектора для токамака TCV, а также для мощного 5-миллисекундного нагревного инжектора Старт-5 для установки ГДЛ.

Литература

1. R.Uhlemann, R.S Hemsworth, G. Wang, H. Euringer “Hydrogen and deuterium ion species mix and injected neutral beam power fractions of the TEXTOR-PINIs for 20-60 kV determined by Doppler shift spectroscopy”, January 1992, Insitut fur Plasmaphysik, Germany

2. S.J. Yoo, H.L. Yang, S.M. Hwang “Measurement of angular divergence and ion species ratios of an rf-driven multicusp ion source for diagnostic neutral beam by Doppler shift spectroscopy”, September 1999, Korea Basic Science Institute, Korea
3. G. Bracco, C. Breton, C. de Michelis, M. Mattioli, J. Ramette “High-power neutral-beam angular-divergence evaluation from spectrally resolved Doppler measurements”, July 1981, Association EURATOM-CEA sur la Fusion, Département de Recherches sur la Fusion Controlée, Centre d’Etudes Nucléaires, Boîte Postale No. 6, 92260 Fontenay-aux-Roses, France.
4. Усольцев Д.В. “Оптические измерения состава в инжекторах нейтральных частиц с дуговым и ВЧ источниками плазмы”, Новосибирск 2001
5. I. Williams, J. Geddes, H. Gilbody “Balmer α emission in collisions of H, H⁺, H₂⁺ and H₃⁺”, January 1982, Department of Pre and Applied physics, The Queen’s University of Belfast, Belfast, Northern Ireland