

Министерство Образования и Науки РФ  
Федеральное Государственное Автономное Образовательное  
Учреждение Высшего Профессионального Образования  
«Московский Физико-Технический Институт  
(Государственный Университет)»

Факультет Проблем Физики и Энергетики  
Кафедра Высоких Плотностей и Энергий

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(магистерская работа)**

Спектральная диагностика пылевой плазмы в положительном столбе  
газового разряда низкого давления

Направление подготовки: 010900 «Прикладные математика и физика»

Студент:  
\_\_\_\_\_ А. В. Шоненков  
«\_\_\_» июня 2018 г.

Научный руководитель:  
\_\_\_\_\_  
к.ф.-м.н. А. Д. Усачев  
«\_\_\_» июня 2018 г.

Москва, 2018 г.

## **Аннотация**

Текст

## **Содержание**

Введение . . . . .	4
Глава 1 Спектральная диагностика низкотемпературной плазмы газового разряда . . . . .	6
Глава 2 Влияние пылевых частиц на кинетические процессы . . . . .	15
Глава 3 Космическая аппаратура “Плазменный кристалл-4” . . . . .	16
Глава 4 Программа “Spectral Analyzer PK-4” . . . . .	22
Глава 5 Анализ спектральных данных . . . . .	26
Заключение . . . . .	27
Список литературы . . . . .	28
Приложение . . . . .	29

## Введение

Диагностика плазмы является основой для выбора теоретических моделей и интерпретации полученных данных. Главные диагностируемые параметры в не намагниченной плазме - концентрация ионов  $n_i$  и электронов  $n_e$ , температура ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$ , функция распределения электронов  $f_e$ , а также распределение пространственно-электрического потенциала  $\phi(r)$ . Зная последнее, можно получить распределение напряженностей электрических полей  $E = \phi(r)$ .

Существует целый спектр различных методов диагностики плазмы - электрические (зондовые), оптические, спектральные, корпускулярные, микроволновые [ссылка на источник]. Как правило, плазма существенно неоднородная, а измерения содержат существенные ошибки. Наиболее достоверными являются параметры плазмы, измеренные двумя независимыми методами. Использование комбинаций различных методов позволяют получать данные, недоступные каждому методу в отдельности. Например, спектральные методы позволяют экстраполировать в пространстве данные зондовых измерений.

Несмотря на свой почтенный возраст, зондовая диагностика остается наиболее достоверным базовым видом диагностики плазмы. В общем случае из полученной зондовой вольт-амперной характеристики можно извлечь все основные параметры плазмы. Основным недостатком зондового метода является его инвазивность и необходимость обустройства специальных фланцев для ввода зондов. Что касается зондовой диагностики пылевой плазмы, то она мало перспективна ввиду того, что зонд крайне сильно возмущает пылевое облако. В настоящее время на Международной космической станции (МКС) находится российско-европейская научная аппаратура “Плазменный кристалл - 4” (НА ПК - 4) для изучения фундаментальных свойств пылевой плазмы в положительном столбе газового разряда низкого давления. Одной из задач этого эксперимента является изучение влияния пылевой компоненты на спектр излучения положительного столба и определение по жтому изменению спектра изменение параметров плазмы - в

первую очередь изменения электронной температуры. Полноценная интерпретация полученных спектральных данных требует составления и самосогласованного решения кинетического уравнения Больцмана в нелокальном приближении для положительного столба с пылевой компонентой, что является сложной задачей.

Целью данной работы является исследование влияния протяженного пылевого облака на спектральные характеристики положительного столба газового разряда и определение по данным характеристикам изменения электронной температуры в облаке. Для этого был проведен обзор экспериментальных спектральных данных, полученных на научной аппаратуре ПК - 4 за время ее эксплуатации, выбор наиболее удачных с точки зрения поставленной задачи экспериментов, обработка спектров и их интерпретация в рамках столкновительно-радиационной модели.

# Глава 1 Спектральная диагностика низкотемпературной плазмы газового разряда

## 1.1 Кинетика заселения возбужденных атомных состояний в плазме

Спектры излучения газоразрядной плазмы определяются населенностью  $N_j$  соответствующих возбужденных атомных уровней  $E_j$ . Тогда интенсивность соответствующей атомной спектральной линии составит:

$$I_{ji} = A_{ji} h \nu_{ji} \cdot N_j \quad (1.1)$$

где  $A_{ji}$  - коэффициент Эйнштейна для перехода  $j \rightarrow i$ ,  $N_j$  - населенность возбужденного уровня  $j$ .

Таким образом, задача спектральной диагностики плазмы сводится к построению теоретических моделей, связывающих параметры плазмы (в первую очередь, концентрации электронов  $n_e$  и их температуру  $T_e$ ) с интенсивностями спектральных линий  $I_{ji}$ . Выбор той или иной модели зависит от параметров плазмы: ее химического состава, плотности, степени ионизации и равновесности. В данной работе экспериментально и теоретически исследуется стационарная сильно неравновесная плазма положительного столба слаботочного газового разряда постоянного тока ( $I_{DC} = 1$ ) в неоне при давлении  $P = 50$ , причем степень ионизации плазмы очень мала ( $\alpha \sim 10^{-8}$ ). Выбор этих параметров обуславливается практическим случаем, рассматриваемым в этой работе.

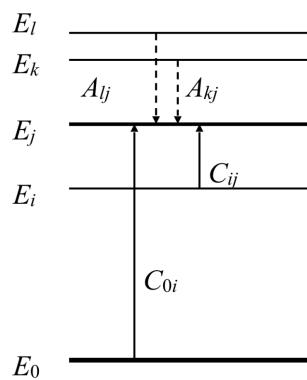


Рис 1.1 — Схема основных процессов заселения уровня  $E_j$ .

Населенность  $N_j$  уровня  $E_j$  в стационарном случае определяется балансом процессов его заселения и расселения. Схема основных процессов заселения уровня  $E_j$  представлена на рис. 1.1. Основным процессом заселения рассматриваемого уровня  $E_j$  является его заселение прямым электронным переходом с основного состояния  $E_0$  и с метастабильного  $E_i$ .

Скорости процессов  $C_{0j}$  и  $C_{ij}$  определяются соотношениями:

$$C_{0j} = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{E_j}^{\infty} \sigma_{0j}(E) f_e(E) \sqrt{E} dE \quad (1.2)$$

и

$$C_{ij} = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{E_j - E_i}^{\infty} \sigma_{ij}(E) f_e(E) \sqrt{E} dE \quad (1.3)$$

соответственно, где ...

Сечения  $\sigma_{0j}(E)$  и  $\sigma_{ij}(E)$  расчетные и экспериментальные, можно найти в литературе или базе данных NIST [ССЫЛКА НА ИСТОЧНИК]. Типичный вид сечений представлен на рис. 1.2. Что касается вида ФРЭ, то она сильно зависит от параметров плазмы. При высоких давлениях ФРЭ приближается к максвелловской функции. Однако, при низких давлениях плазма сильно неравновесна, и вид функции ФРЭ должен быть определен дополнительными методами. Кроме столкновительного заселения уровней  $E_j$  заселяется также путем радиационного распада верхних  $k$ -уровней  $E_k > E_j$  со скоростью  $A_{kj}$  при  $k > j$ . Значения  $A_{kj}$  также табулированы в базе данных NIST.

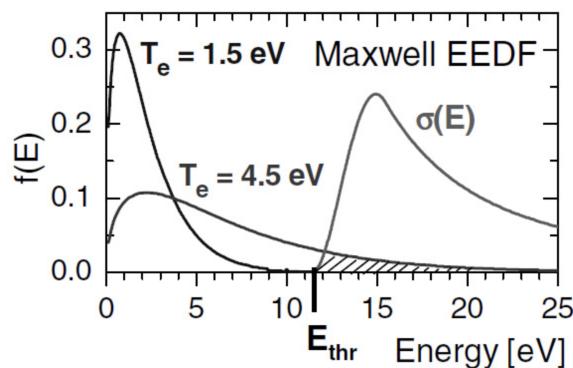


Рис 1.2 — Типичный вид сечения  $\sigma$  и максвелловской ФРЭ.  $T_e$  - температура электронов,  $E_{thr}$  - пороговая энергия..

Схема основных процессов расселения уровня  $E_j$  представлена на рис. 1.3. Этими процессами также являются явления спонтанного распада возбужденных уровней и столкновительные процессы, индуцированные свободными электронами.

Приравняв скорости заселения и расселения уровня  $E_j$ , мы получим уравнение относительно ФРЭ  $f_e(E)$ . Это уравнение является некорректной задачей и для ее решения необходимы дополнительные данные о виде ФРЭ. Эти данные могут быть получены путем решения кинетического уравнения Больцмана для соответствующих условий.

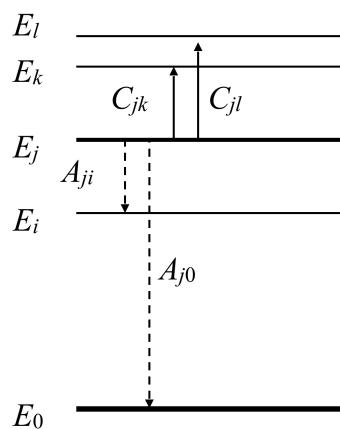


Рис 1.3 — Схема основных процессов расселения уровня  $E_j$ .

## 1.2 Уравнение Больцмана для ФРЭ в положительном столбе газового разряда постоянного тока.

Плазма тлеющего разряда низкого давления имеет сильно неравновесный характер. Рождение заряженных частиц происходит преимущественно в объемных процессах, а гибель на стенках разрядной камеры. Энергию электроны приобретают, разгоняясь в электрическом поле, а теряют в упругих и неупругих столкновениях. Количественное описание этих процессов возможно только на кинетическом уровне [1].

Как известно, существует один из подходов описания системы на кинетическом уровне при помощи уравнения Больцмана, которое представляет собой интегродифференциальное уравнение, описывающее поведение разреженного газа. Данное уравнение было выведено Людвигом Больцманом в 1872 г. Оно до сих пор остается основой

кинетической теории газов и оказывается плодотворным не только для исследования классических газов, которые имел в виду Больцман, но - при соответствующем обращении - и для излучения переноса электронов в твердых телах и плазме [2].

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\Delta}_r) f_e + \frac{e}{m_e} (\vec{E}, \vec{\Delta}_v) f_e = S_{coll} \quad (1.4)$$

где  $S_{coll}$  — интеграл столкновений,  $f_e = f_e(\vec{r}, \vec{v}, t)$  - функция распределения электронов

Для решения данного уравнения достаточно использовать двучленное приближение:

$$f_e(\vec{r}, \vec{v}, t) = f_0(\vec{r}, \vec{v}, t) + \frac{\vec{v}}{v} f_1(\vec{r}, \vec{v}, t) \quad (1.5)$$

где  $f_1$  отвечает за анизотропию.

Подставив это приближение в исходное уравнение и усреднив по направлениям скоростей, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \nu f_1 = -v \nabla f_0 - \frac{e E_z}{m} \frac{\partial f_0}{\partial v}, \\ \frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{v}{3} \operatorname{div}(f_1) + \frac{1}{3v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{v^2 e E_z}{m} f_1 \right) = S_0 \end{cases} \quad (1.6)$$

Данную систему иногда называют системой Давыдова-Эллиса [ССЫЛКА НА ИСТОЧНИК].  $S_0$  — интеграл столкновений, отвечающий за упругие и неупругие электрон-атомные столкновения и электрон-электронные взаимодействия.

$$S_0 = \sum_k [\sqrt{\epsilon + \epsilon_k} \nu_k(\epsilon + \epsilon_k) f(\epsilon + \epsilon_k) - \sqrt{\epsilon} \nu_k(\epsilon) f(\epsilon)] \quad (1.7)$$

где суммирование проводится по всем верхним уровням, а  $\nu_k(\epsilon) = \sigma_k(\epsilon) N_g \sqrt{\epsilon}$ ,  $N_g$  - концентрация атомов

Перейдя от скоростей к энергиям в системе Давыдова-Эллиса и подставив выражение для  $f_1$  в нижнее уравнение, получим:

$$\begin{aligned} \sqrt{\epsilon} \frac{\partial f}{\partial t} &= \sqrt{\frac{2}{m}} \left( N_g S_0 + 2 \frac{m}{m_{Ne_2}} N_g \frac{\partial}{\partial \epsilon} [\sigma_t(\epsilon) \epsilon^2 f(\epsilon)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^2 E_z^2}{3N_g} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[ \frac{\epsilon}{\sigma_t(\epsilon)} \frac{\partial f}{\partial \epsilon} \right] \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Если предположить, что функция распределения электронов с течением времени выйдет на стационарный уровень, то данную формулу можно использовать для построения разностной схемы.

Метод временной эволюции позволяет вычислить функцию распределения электронов из предыдущей формулы с помощью следующей разностной схемы:

$$f^n(\epsilon) - f^{n-1}(\epsilon) = \Delta t \sqrt{\frac{2}{m_e \epsilon}} \left[ N_g \sum_k \left[ (\epsilon + \epsilon_k) \sigma_k(\epsilon + \epsilon_k) f^{n-1}(\epsilon + \epsilon_k) - \epsilon \sigma_k(\epsilon) f^{n-1}(\epsilon) \right] + \right. \\ \left. + \frac{2m_e}{m_{Ne_2}} N_g \frac{f^{n-1}(\epsilon + \Delta\epsilon) \sigma_t(\epsilon + \Delta\epsilon)(\epsilon + \Delta\epsilon)^2 - f^{n-1}(\epsilon - \Delta\epsilon) \sigma_t(\epsilon - \Delta\epsilon)(\epsilon - \Delta\epsilon)^2}{2\Delta\epsilon} + \right. \\ \left. + \frac{e^2 E_z^2}{3N_g} \frac{1}{\Delta\epsilon} \left[ \frac{(\epsilon + \frac{\Delta\epsilon}{2})(f^{n-1}(\epsilon + \Delta\epsilon) - f^{n-1}(\epsilon))}{\Delta\epsilon \sigma_t(\epsilon + \frac{\Delta\epsilon}{2})} - \frac{(\epsilon - \frac{\Delta\epsilon}{2})(f^{n-1}(\epsilon) - f^{n-1}(\epsilon - \Delta\epsilon))}{\Delta\epsilon \sigma_t(\epsilon - \frac{\Delta\epsilon}{2})} \right] \right] \quad (1.9)$$

где  $f^n$  – n-конфигурация ФРЭ во времени, n – это порядковый номер шага по времени;  $\epsilon$  – энергия в эВ;  $\Delta\epsilon$  – шаг по энергии в эВ;  $\sigma_t(\epsilon)$  – транспортное сечение упругого рассеяния;  $\sigma_k(\epsilon)$  – сечение неупругих столкновений для k-уровня;  $N_g$  – концентрация атомов Ne;  $m_{Ne_2}$  – масса молекулы Ne;  $m_e$  – масса электрона;  $E_z$  – осевое электрическое поле, которое задается параметрически в диапазоне [1, 10] В/см с шагом 0.1 В/см;  $e$  – заряд электрона

Использовались следующие граничные условия:

$$\begin{cases} \frac{df}{d\epsilon}(0) = 0 \\ f(\infty) = 0 \end{cases} \sim \begin{cases} f_n^0 = f_n^1 \\ f_n^K = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

K – количество шагов по энергии за одну итерацию по времени, в рамках данной задачи 50 эВ можно считать уже бесконечно большой.

### 1.3 Решение уравнения Больцмана и результаты

В качестве начальных условий первого вычисления ФРЭ (при  $E = 1$  В/см) удобнее всего выбрать распределение Больцмана, поскольку оно близко к итоговому решению. Удобство заключается в скорости сходимости алгоритма: чем приближеннее возьмем начальное условие, тем быстрее наступит стационарный уровень. Затем для расчета ФРЭ

для следующего поля лучше всего использовать в качестве начальных условий решение от предыдущего поля (см. рис 1.4).

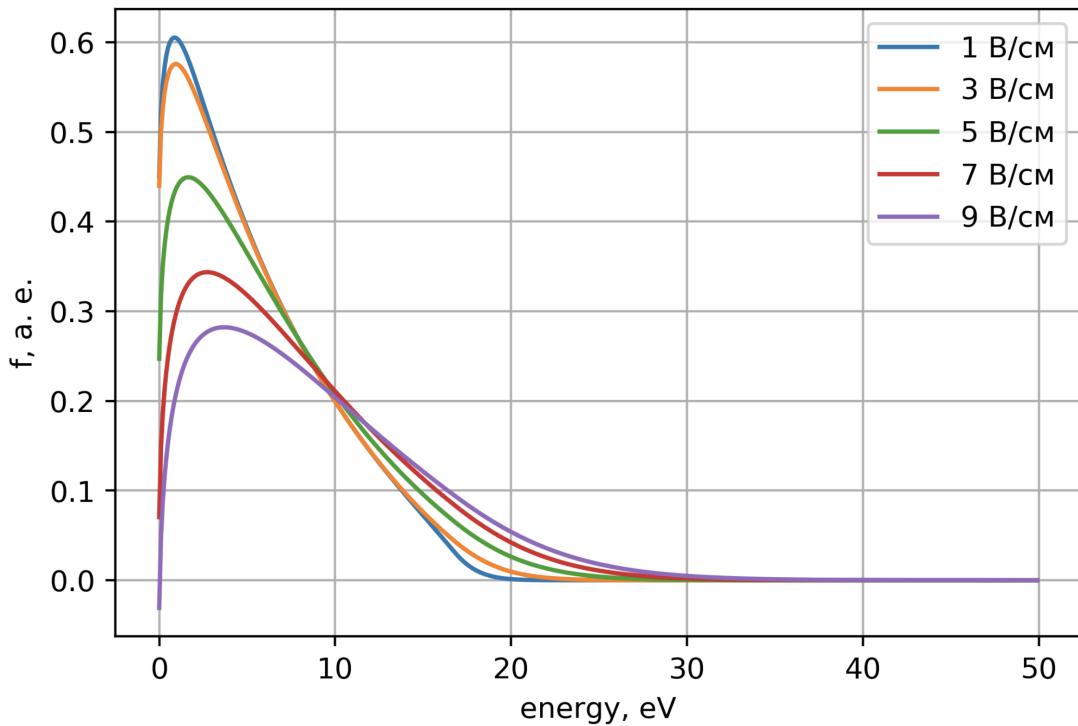


Рис 1.4 — Зависимость расчетной функции распределения электронов от энергии и осевого электрического поля, заданного параметрически для некоторых значений.

Особый интерес в исследовании ФРЭ представляет зависимость в логарифмическом масштабе, поскольку заметить различия между расчетным распределением и распределением Больцмана на глаз практически невозможно. Распределение Больцмана в логарифмическом масштабе представляет собой линейную зависимость в отличие от расчетной (см. рис 1.5).

Из данного графика видно, что расчетная функция распределения электронов принимает двухтемпературный вид. Это связано с тем, что электроны, имеющие энергию выше пороговой ( $E_{thr}$ ) участвуют в неупругих столкновениях с атомами.

Поскольку в логарифмическом масштабе функция распределения электронов представляет собой два четко выраженных линейных участка (двухтемпературный вид), это позволяет рассматривать эти участки независимо друг от друга со своими электронными

температурами:

$$f_e = e^{-\frac{\epsilon}{T_e}} \Rightarrow \ln(f_e) = -\frac{\epsilon}{T_e} \quad (1.11)$$

Зная электронную температуру невозмущенного пылевыми частицами газового разряда, можно определить электронную температуру с пылевыми частицами из соотношения логарифмов функций распределения энергий:

$$T_{e,2} = \frac{\ln(f_{e,1})}{\ln(f_{e,2})} T_{e,1} \quad (1.12)$$

Для разрешения данного соотношения необходимо понять какие из функций распределения электронов нужно использовать.

Скорость заселения верхних уровней определяется следующим выражением:

$$X_{exc}(T_e) = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(\epsilon) f_e(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon \quad (1.13)$$

где  $\sigma(\epsilon)$  – сечение (вероятность перехода) в зависимости от энергии  $f_e(\epsilon)$  – функция распределения электронов по энергиям

В рамках одного и того же переходного процесса справедливы следующие рассуждения: интенсивность спектральной линии пропорциональна заселенности верхнего уровня данного перехода, которая в свою очередь пропорциональна скорости заселения верхнего уровня, т. е.:

$$I(T_e) \sim N^*(T_e) \sim X_{exc}(T_e) \sim \int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(\epsilon) f_e(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon \quad (1.14)$$

Перейдя к отношению интенсивностей:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(\epsilon) f_{e,2}(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon}{\int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(\epsilon) f_{e,1}(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon} \quad (1.15)$$

Из последнего выражения можно сделать вывод, что отношение интенсивностей задается функцией распределения электронов, а также энергией верхнего уровня. Узнав значение функции распределения электронов для различных значений энергий в зависимости от кинетических параметров, а также выбрав фиксированную линию, можно на основе измеренных значений отношений интенсивностей

узнать относительное изменение кинетических параметров системы, таких как электронная температура и осевое электрическое поле.

Также хочется подчеркнуть, что энергия верхнего уровня влияет на значение отношения интенсивностей, что мы и наблюдаем в эксперименте.

Для невозмущенного состояния исследуемого газового разряда осевое поле было получено из работ [...] и составляет 2.2 В/см, что дает возможность определить ФРЭ  $f_{e,1}$ . Были перебраны все расчетные функции распределения электронов и выбрана та, которая наиболее близко приближает экспериментальные отношения интенсивностей (см. рис 1.6).

Были получены следующие значения:

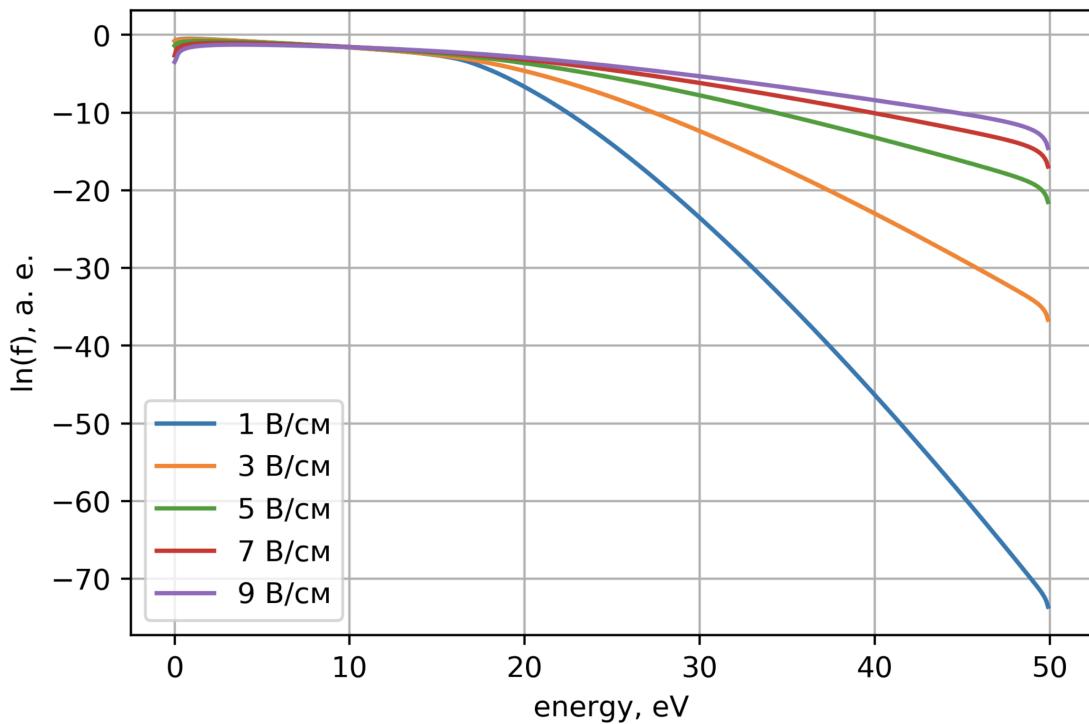


Рис 1.5 — Зависимость расчетной функции распределения электронов от энергии и осевого электрического поля, заданного параметрически для некоторых значений, в логарифмическом масштабе.

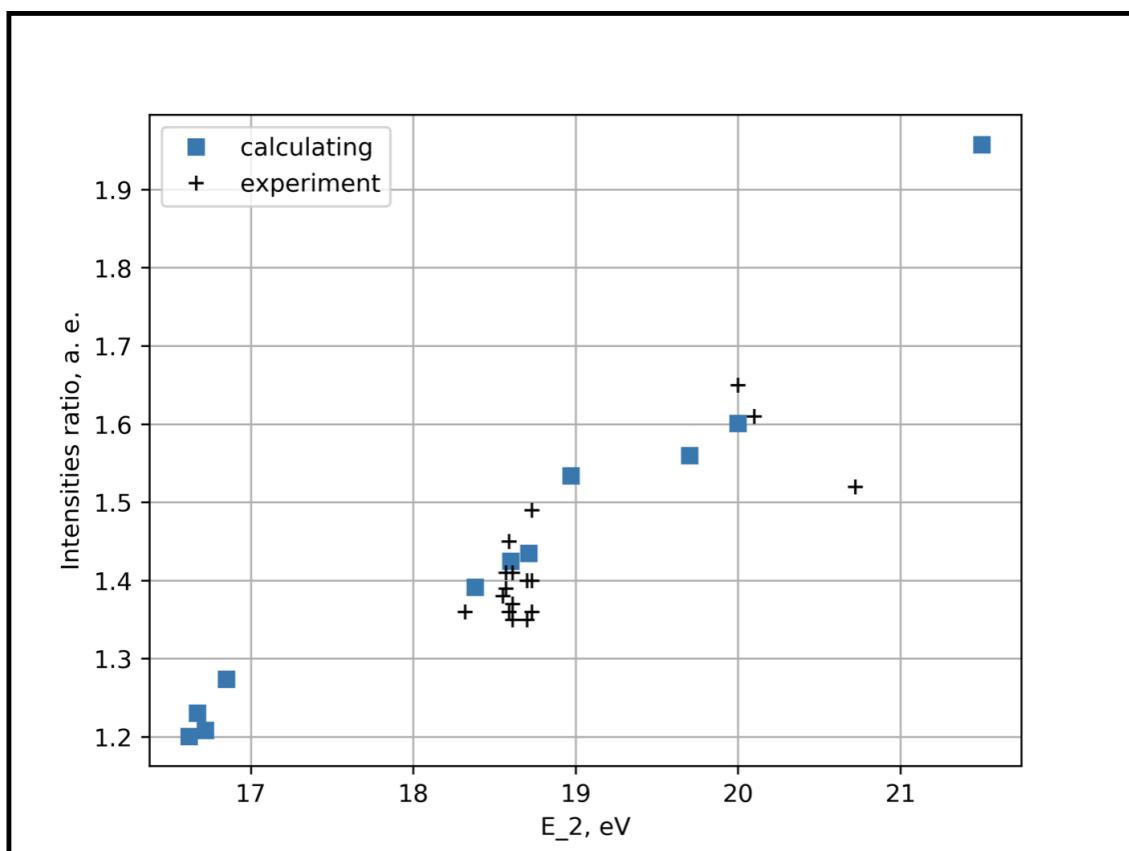


Рис 1.6 — Зависимость ..... .

## **Глава 2 Влияние пылевых частиц на кинетические процессы**

## Глава 3 Космическая аппаратура “Плазменный кристалл-4”

### 3.1 Описание

Космическая аппаратура “Плазменный кристалл - 4” (КА ПК-4) была введена в эксплуатацию на борту Международной космической станции (МКС) в июне 2015 года. Установка предназначена для экспериментального исследования пылевой плазмы в условиях микрогравитации [3]. В отличие от предыдущей космической аппаратуры “ПК-3” [4] и “ПК-3 Плюс” [5], где пылевая плазма создавалась в емкостном радиочастотном (ВЧ) газовом разряде, в КА ПК-4 пылевая плазма создается в однородном положительном столбе газового разряда в режиме комбинированного постоянного тока, а также в индуктивном ВЧ разряде. Условия микрогравитации оказывают влияние на создание вытянутых пылевых облаков в однородном положительном столбе [6], благодаря чему становится возможным создать в лабораторных условиях небольшое облако пыли со средним размером 1 см [7].

### 3.2 Экспериментальная установка

Основой экспериментальной установки является П-образная стеклянная разрядная трубка с внутренним диаметром 30 мм с общей длиной 85 см, заполненной неоном под давлением 40 Па (см рис. 3.1).

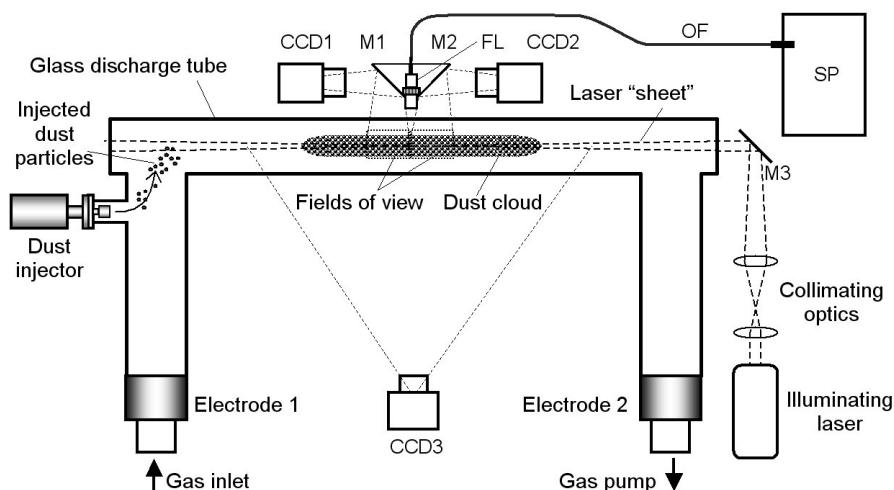


Рис 3.1 — Схема экспериментальной установки космической аппаратуры “Плазменный кристалл-4”.

Трубка оборудована двумя цилиндрическими электродами из нержавеющей стали установленных на ее концах для создания и поддержания разряда постоянного тока. Системы вакуумной откачки и газового наполнения соединяются с концами трубы через электроды. В течение 2 дней трубка откачивается до базового давления  $< 2 \times 10^{-5}$  мбар, а затем заполняется неоном до рабочего давления разряда 0,5 мбар. Ток разряда  $I_{DC} = 1$  мА. Монодисперсные пластические (меламиноформальдегидные) микросфера (частицы пыли) с диаметром  $d = 3,38 \pm 0,07$  мкм впрыскиваются с катодной стороны разрядной трубы с помощью пылевого инжектора, затем транспортируются в центр трубы электрическим полем постоянного тока для дальнейшего наблюдения. Пылевые частицы подсвечиваются зеленым (532 нм) лазерным «ножом» и регистрируются двумя камерами наблюдения с высоким разрешением (до разрешения пылевых частиц). Каждая камера имеет поле зрения  $22 \times 17$  мм<sup>2</sup> с разрешением  $1600 \times 1200$  пикселей с частотой 35 кадров в секунду. Камеры дополняют друг друга, присоединяясь меньшими сторонами и имеют общий размер  $44 \times 17$  мм<sup>2</sup>. Эффективная полуширина лазерного «ножа» составляет 50 мкм в центре поля зрения, а также 180 мкм по краям. В дополнение к видеокамерам высокого разрешения, КА ПК-4 оборудована третьей камерой для наблюдения за подсвеченной плазмой (PGO) с разрешением  $640 \times 480$  пикселей и частотой  $f_{PGO} = 15$  кадров в секунду.

Используя калейдоскопическую систему, камера PGO наблюдает плазменное свечение в центральной части разрядной трубы через 3 спектральных фильтра: один серый фильтр с пропусканием 12% и два узкополосных помеховых фильтров, настроенных на 705 и 587 нм.

### 3.3 Спектрометр “OceanOptics USB2000+”

Для осуществления спектральной диагностики КА ПК-4 применяется мини-спектрометр OceanOptics USB2000+. В основе лежит 2048-пиксельная ПЗС-линейка, которая позволяет проводить спектральные измерения в диапазоне длин волн 350-1100 нм со

спектральным разрешением 1,5 нм. Приемная оптика спектрометра устанавливается рядом с камерами высокого разрешения РО и подключается к спектрометру через оптическое волокно (см рис. 3.1). Время считывания одного спектра составляет 4 с. Основная цель применения спектрометра в данной аппаратуре - это контроль чистоты плазмы во время экспериментов на основе спектральных методов поиска примесей.

### 3.4 Экспериментальные данные

В космической аппаратуре “Плазменный кристалл-4” выделены следующие каналы получения экспериментальных данных, которые были задействованы в какой-либо мере в данной работе:

а) Видеозаписи с двух камер высокого разрешения РГО. Представляют собой файлы в формате “.avi” с размером 10 Gb/min в сыром виде (см рис. 3.2).

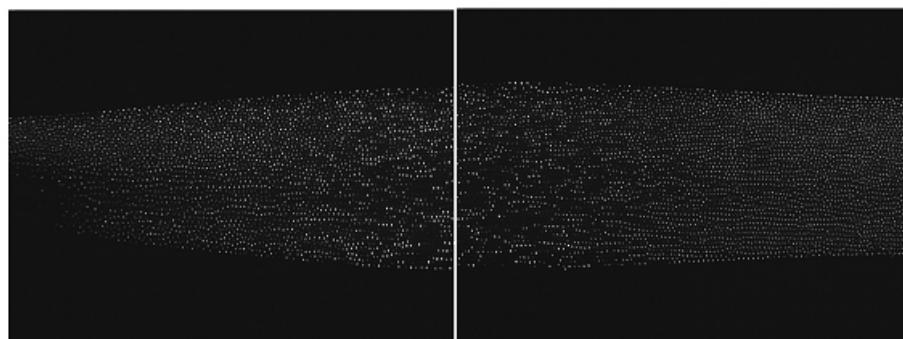


Рис 3.2 — Кадры видеозаписей с двух камер наблюдения высокого разрешения РГО. Кадры синхронизированы во времени, а также пространственно дополняют друг друга.

б) Видеозаписи с общей камеры наблюдения. Представляют собой файлы в формате ... с размером ... (см рис. 3.3).

в) Спектральные данные. Представляют собой текстовые файлы в формате “.dat”, которые имеют следующую структуру по одному измеренному спектру:

```
#####
# PK4 EAC SW -- Spectrometer
# started 2016-10-09'13:30:07.35 ~
```

```

# HPC=13819291278696 / HPCFreq=1496280000 Hz => HPC uptime = 9235.765551 s
# 2016-10-09'13:30:04.89; spectrometer commanded
# 2016-10-09'13:30:07.35; spectrometer response received
#--- spectrum ---
# 65535; spectrum start marker
#      0; data size flag
#      1; nr scans accumulated
#    250; integration time /ms
#      0; reserved value FPGA_ESV_MSW
# 12118; reserved value FPGA_ESV_LSW
#      0; pixel mode
0:      0
1:    628
2:    640
.....
<pixel>; <value_of_pzs_linear>
.....
2046:   671
2047:   675
# 65533; spectrum end marker
#== spectrum == read-out time = 2.124 s
# ended      2016-10-09'13:30:07.39 ~ (execution time = 0.032088 s)
# PK4 EAC SW -- Spectrometer
#####

```

г) Логи. Представляют собой текстовые файлы в формате “.log”, которые содержат информацию обо всех технических изменениях в ходе эксперимента с временными отметками.

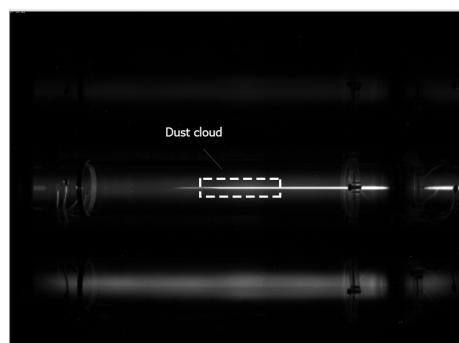


Рис 3.3 — Кадр видеозаписи с общей камеры наблюдения с отмеченным пылевым облаком.

д) В качестве исследования были обработаны сырье спектральные данные, полученные при одних и тех же технических условиях системы, в отсутствие пылевого облака, а также в присутствии пылевого облака (см рис. 3.4).

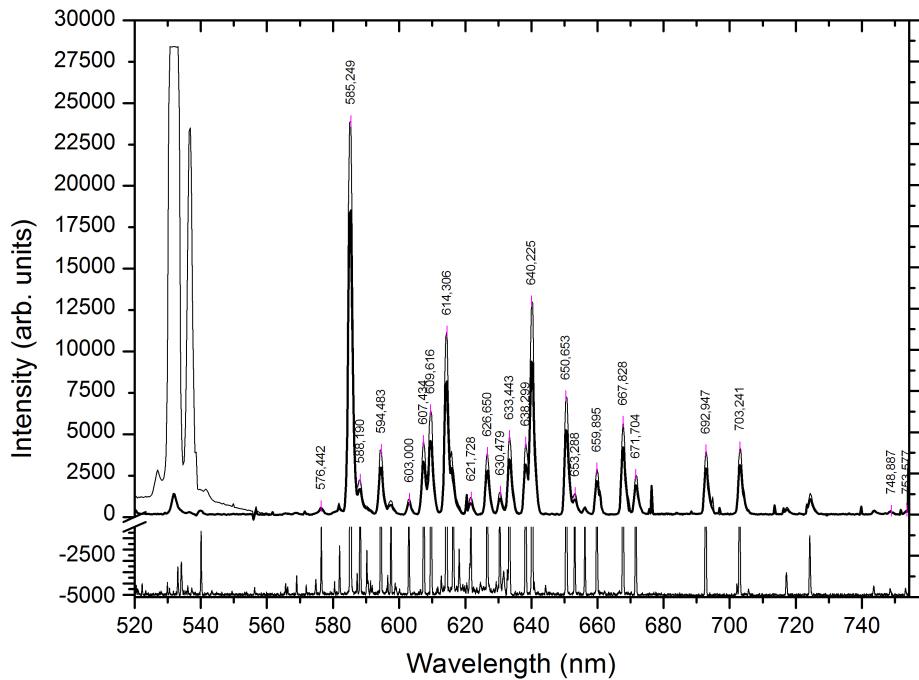


Рис 3.4 — Зависимость интенсивности ( усл. ед.) от длины волны (нм). На графике наложены три спектра: 1. Ниже нуля калибровочный спектр с достоверными линиями неона; 2. Жирной линией выделен спектр без пылевого облака. 3. Тонкой линией выделен спектр с пылевым облаком

Экспериментально было обнаружено увеличение интенсивности спектральных линий при попадании пылевого облака в газовый разряд неона, причем линии с разными верхними энергетическими уровнями имеют разные значения отношений интенсивностей (см рис. 3.5).

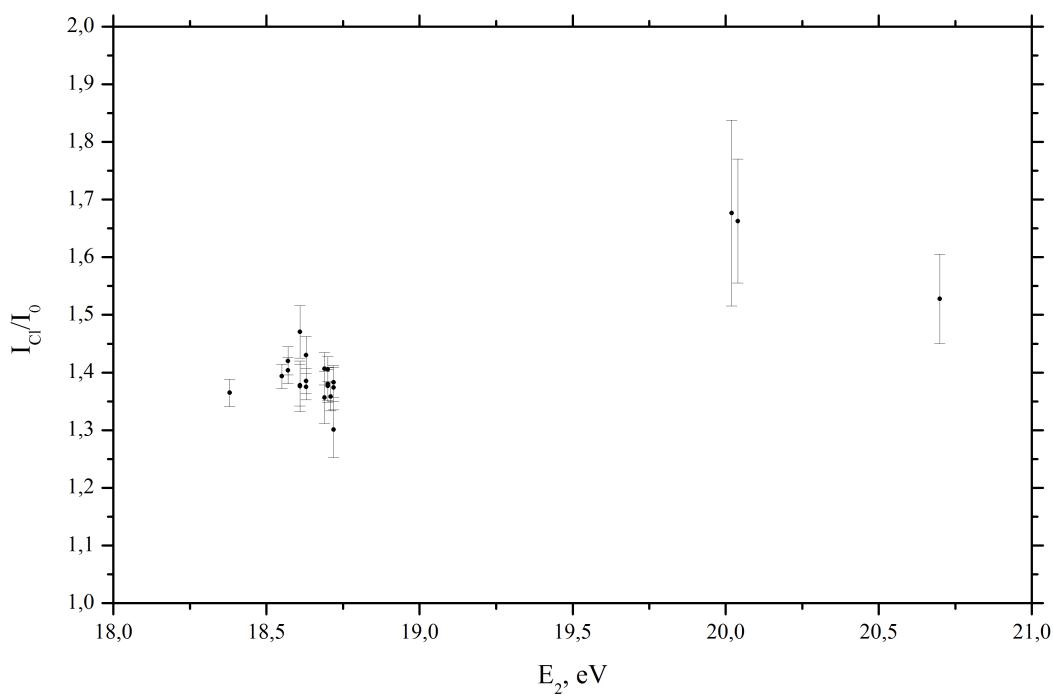


Рис 3.5 – Зависимость отношения интенсивностей спектральных линий неона в присутствии пылевого облака к отсутствию пылевого облака.

## **Глава 4 Программа “Spectral Analyzer PK-4”**

### **4.1 Актуальность программы**

В ходе данной работы был создан веб-сервис “Spectral Analyzer PK-4”, название которого состоит из двух частей: первая часть (“Spectral Analyzer”) обозначает главную задачу сервиса - спектральный анализ, а вторая часть говорит о том, что анализ осуществляется на данных, полученных с исследуемой в текущей работе экспериментальной установки “Плазменный кристалл-4” (PK-4).

Поскольку спектральные данные представляют собой довольно сложную, но упорядоченную структуру данных (см раздел 3.4), то ручная обработка и графическое построение даже одного спектра становится довольно тяжким трудом - необходимо уметь ориентироваться в текстовых логах, а также владеть навыками работы как минимум с двумя программами одновременно - Origin и Excel. У умелого пользователя данных программ (при большом желании) получится построить один спектр не быстрее, чем за 5 мин. Так как в одном эксперименте возможность встретить более 1000 спектров - обычное явление, то даже таких умений становится недостаточно. Более того, для получения важных физических выводов со спектральных данных, необходимо учитывать шумовой фон, усреднять идентичные спектры при одних и тех же физических условиях, калибровать шкалы и др, от построения полусотни спектров вручную реального продвижения в поставленной задаче не будет.

Таким образом было решено создать автоматизированное компьютеризированное программное обеспечение для решения данной проблемы.

### **4.2 Требования к программе**

Чтобы было не только удобно и практично пользоваться и совершенствовать программу, а также чтобы достичь решения поставленной задачи, были выдвинуты определенные требования к программе.

Во первых, программа должна обладать свойством кроссплатформенности, т.е. независимо от типа операционной системы она должна работать корректно. Конкретнее, должна быть возможность работы под следующими операционными системами: Windows XP - Windows 10, MacOs, Linux с графической оболочкой.

Во вторых, программа должна иметь возможность сохранения ключевых состояний процесса обработки данных, а также максимально безболезненно передавать прогресс между пользователями.

Далее, программа должна уметь в автоматическом режиме загружать и парсить текстовые спектральные данные (эксперименты), а также отображать список уже загруженных экспериментов.

Следующий важнейший аспект - это умение динамически отображать более 1000 спектральных графиков в одном рабочем окне, отображать метаинформацию по текущему спектру.

Для обработки спектров необходимо учитывать фоновое излучение, поэтому программа должна иметь возможность по выбранным пользователем номерам спектров усреднять их интенсивности, а также вычтать из всех спектров текущего эксперимента.

Не менее важный аспект - это возможность настроить калибровку спектра по длине волны на основе вводимой пользователем полиномиальной функции.

Далее, для поиска отношений интенсивностей необходимо на основе откалиброванных не зашумленных спектров сохранять усредненные заготовки с учётом среднеквадратичных погрешностей, также необходимо отображать список уже сохранённых усредненных спектров.

В силу того, что используемый спектрометр “OceanOptics USB2000+” имеет не высокую разрешающую способность (см раздел 3.4), то для корректного поиска отношений интенсивностей необходимо учитывать наложения линий друг на друга с помощью аппаратной функции спектрометра, т.е. следующее требование к программе: она должна уметь на основе полиномиального приближения

аппаратной функции учитывать перекрытия рядом стоящих линий вместе с погрешностями.

В данной работе особый интерес представляет зависимость отношения интенсивностей определенных линий от энергии возбужденного состояния, для этого программа должна иметь библиотеку спектральных линий, а также функционал по выбору набора линий при построении данной зависимости.

Таким образом, мы перечислили основные требования к программе, а сейчас разберем основной стек технологий, который был изучен для достижения данных целей.

### 4.3 Стек изученных технологий

Первый прототип программы был написан традиционным образом на языке C#, который непременно предполагает стандартную установку под Windows и работу с программой, как с ПО для данной операционной системы. В данном варианте было реализовано лишь около 20% необходимого функционала, но при этом возникли большие трудности с передачей программы научному руководителю из-за несовместимости версий Windows 7 и XP.

Для решения проблем кроссплатформенности и передачи данных между пользователями было решено создать веб-сервис, который работает в обычном браузере, поскольку почти каждая операционная система с графической оболочкой поддерживает большинство современных браузеров.

Django (Джанго) — свободный фреймворк для веб-приложений на языке Python, использующий шаблон проектирования MVC. Проект поддерживается организацией Django Software Foundation [8]. Джанго имеет удобную гибкую внутреннюю архитектуру, которая позволяет разработчикам, при достаточных знаниях, выполнять огромный спектр задач из области веб-программирования. Перечислять все возможности данного фреймворка нет необходимости, подчеркнем лишь те, что были использованы для решения поставленных задач. Джанго имеет свою стандартизированную ORM, которая поддерживает транзакции. ORM

- это некая оболочка над базой данных, которая позволяет использовать функционал базы данных с помощью объектно-ориентированного языка программирования, в данном случае с помощью Python. Далее, в Джанго есть система маршрутизации урлов, которая позволяет настраивать POST и GET запросы на основе регулярных выражений, что очень удобно, поскольку в Python есть встроенный модуль “re”, который почти ничем не отличается по синтаксису.

## **Глава 5   Анализ спектральных данных**

## **Заключение**

Текст заключения

## Список литературы

1. Зобнин, A.B. Нелокальная модель пространственно-неоднородного положительно столба разряда постоянного тока / А.В. Зобнин. — 2009. — Т. 47, № 6. — С. 803–810.
2. Черчиньяни, К. Теория и приложения уравнения Больцмана / К. Черчиньяни. — М.: Мир, 1978. — 495 с.
3. Pustylnik, M. Y. Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station / M. Y. Pustylnik et al. // *Rev. Sci. Instrum.* — 2016. — Vol. 87. — P. 093505.
4. PKE–Nefedov: plasma crystal experiments on the International Space Station / A.P. Nefedov, G.E. Morfill, V.E. Fortov et al. // *New J. Phys.* — 2003. — Vol. 5. — P. 33.
5. Complex plasma laboratory PK-3 plus on the international space station / H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov et al. // *New J. Phys.* — 2008. — Vol. 10. — P. 033036.
6. Elongated dust clouds in a uniform DC positive column of low pressure gas discharge / A. D. Usachev, A. V. Zobnin, O. F. Petrov et al. // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2016. — Vol. 25. — P. 035009.
7. Crystallization of a dusty plasma in the positive column of a glow discharge / V.E. Fortov, A.P. Nefedov, V.M. Torchinskii et al. // *JETP Lett.* — 1996. — Vol. 64, no. 2. — Pp. 92–8.
8. Foundation, Django Software. Django Documentation Release 2.1.dev20180424030402 / Django Software Foundation. — 2018, April. — 1870 pp.
9. Очкин, В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы / В.Н. Очкин. — ФИЗМАТЛИТ, 2006. — С. 32.

## **Приложение**