

Отчет о проделанной научной работе за осенний семестр 2020 года.

Определение параметров плазмы с помощью эмиссионной спектроскопии.

Уланов Павел Юрьевич, группа 204М.

Для расчета параметров плазмы использовались методы эмиссионной спектроскопии. Спектры регистрировались при импульсном напряжении 25 кВ и электрическом токе ≈ 1 кА. В проделанной работе измерялись значения энергии электронов и значения приведенного электрического поля E/N с помощью спектров излучения разряда в потоке и в неподвижном воздухе.

1. Определение энергии электронов.

В ходе экспериментов регистрировались эмиссионные спектры скользящего поверхностного разряда. В неподвижном воздухе при высоких давлениях и в потоке присутствует непрерывная часть спектра в области от 200 – 850 нм, характеризующаяся сходным характером огибающей с максимумом в области 410-450 нм. В данной области на континуум накладываются полосы второй положительной системы азота и интенсивные линии атомов.

Для систем электрон – положительный ион существует три типа перехода: свободно – свободные, связно – свободные и связно связные. Свободно-свободные переходы обусловлены тормозным излучением и тормозным поглощением при столкновении электронов с ионами в кулоновском поле. Учитывая, что форма континуальной части спектра имеет схожий характер кривой с тормозным излучением, для построения теоретических графиков использовалась зависимость излучательной способности от длины волны:

$$dJ_{\lambda} = C_1 \frac{n_e n^+}{\lambda^2 T_e^{1/2}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T_e}\right) d\lambda,$$

где C_1 – константа, n_e и n^+ – концентрации электронов и положительных ионов, h и k – константы Планка и Больцмана, c – скорость света, T_e – температура электронов.

При этом излучают в основном кванты с энергией $h\omega \approx kT$, что соответствует максимуму. Для значений энергии электронов 3-10 эВ максимум лежит в диапазоне 70 – 250 нм. При увеличении энергии электронов максимум спектра смещается в ультрафиолетовую область. Для того, чтобы константы не влияли на результат, строился отнесенный спектр на интенсивность на определенной длине волны. Экспериментальная установка имеет широкую длинноволновую область от 150 – 1100 нм, так что в первой серии экспериментов использовалась длина волны в середине диапазона ≈ 600 нм. Для сравнения строились несколько теоретических спектров для значений энергий электронов 1 эВ, 3 эВ, 10 эВ и экспериментальный спектр в неподвижном воздухе при высоком давлении и в потоке (Рис.1). Для энергий выше 3 эВ в области континуума профили спектров слабо различимы и меняются на уровне шума от наложенных линий атомов. Для длин волн от 510 – 645 нм наблюдается наилучшее соответствие теоретической зависимости и экспериментальных данных.

Однако это достаточно узкая полоса, чтобы достоверно говорить о сходимости теоретического профиля с экспериментальным. Для общей области от 200 – 850 нм, полученная полоса соответствия составляет лишь 20%.

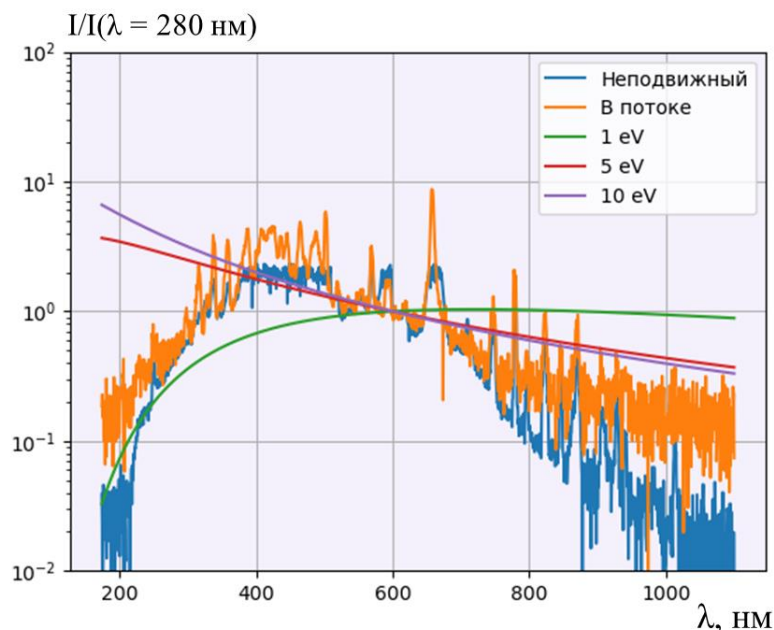


Рис. 1 Спектры неподвижного воздуха (плотность 0.12 кг/м^3) и в потоке (число Маха 1.55) с нанесенными теоретическими зависимостями.

Также были проведены цифровая обработка, при которой интенсивности нормировались на длину волны, в области которой континуум меньше всего перекрывается полосами (Рис. 2.2). Теоретический спектр был построен при энергии электронов в 1,8 эВ. При 280 нм, на экспериментальном спектре отмечается лишь возрастающая часть континуума (Рис. 2.1).

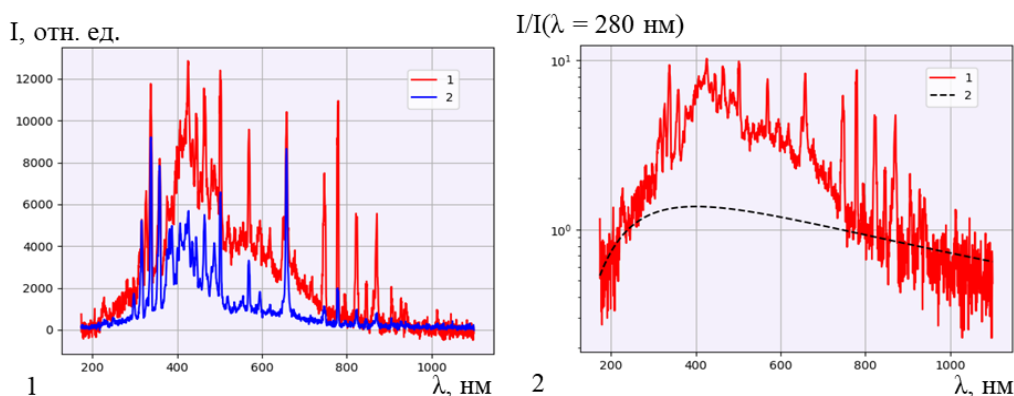


Рис. 2 Эмиссионные спектры в потоке (число Маха 1.37) (1.1) и неподвижном воздухе (плотность 0.10 кг/м^3) (1.2); и экспериментальных данных в потоке (число Маха 1.37) (2.1) сравнение нормированных спектров теоретической зависимости при $T_e = 18000 \text{ K}$ (2.2).

На спектре видно, что экспериментальные данные хорошо сходятся в области от 200 – 300 нм и от 750 – 1100 нм. Учитывая, что в области от 300 – 500 нм на континуум накладывается вторая положительная система азота и линии атомов, профиль теоретического спектра

хорошо согласуется с экспериментом. Однако, максимум теоретической огибающей смещен левее максимум экспериментального спектра.

В результате цифровой обработки спектров, были получены значения для энергии электронов от 1,8 – 2,2 эВ. Результаты обработки, при которой нормировка спектров была на середину длинноволнового диапазона, не были учтены, так как схождение было в узком диапазоне 510 – 645 нм. Так как из-за сильного наложения полос в области максимума невозможно однозначно установить огибающую необходимо ориентироваться на соответствие в области «хвостов».

Из сравнительного анализа можно сделать следующие выводы: профиль континуальной части эмиссионного спектра для неподвижного воздуха и в случае сверхзвукового потока сходится, для разных давлений и чисел Маха, пик непрерывной части лежит в области от 410 – 450 нм, однако из-за сильного наложения линий второй положительной системы азота и полос атомов конкретизировать расположение максимума не представляется возможным, оценочные значения энергий электронов сходятся и лежат в области от 1,8 – 2,2 эВ.

2. Определение

Приведенное электрическое поле рассчитывалось с помощью отношения интенсивностей полос, соответствующих переходу 0-0 второй положительной системы N_2 ($\lambda = 337,1$ нм) и первой отрицательной системы N_2^+ ($\lambda = 391,4$ нм). Скорости реакции прямо пропорциональны плотности электронов, которые, в свою очередь, зависят от величины электрического поля. Отношения констант скоростей находилось из следующего равенства:

$$\frac{[N_2^+(B)]}{[N_2(C)]} = \frac{k_{x \rightarrow B} v_C^q}{k_{x \rightarrow C} v_B^q} \quad (1)$$

где $k_{x \rightarrow B}$, $k_{x \rightarrow C}$ – константы скорости, v_C^q , v_B^q – скорости тушения.

Величина приведенного электрического поля θ (в Таунсенд) находится из полученной величины $\frac{k_{x \rightarrow B}}{k_{x \rightarrow C}}$, найденной из соотношения (1). Для этого необходимо записать эмпирическую формулу связи констант скорости и приведенного электрического поля:

$$\log(k_{x \rightarrow C}) = -8.87 - \frac{228}{\theta} \quad (2)$$

$$\log(k_{x \rightarrow B}) = -9.03 - \frac{509}{\theta} \quad (3)$$

Учитывая соотношения (2) и (3) выпишем соотношение для приведенного электрического поля θ :

$$\theta = - \frac{281}{\log\left(\frac{k_{x \rightarrow B}}{k_{x \rightarrow C}}\right) + 0.16} \quad (4)$$

В результате рассчитав величину $\frac{k_{x \rightarrow B}}{k_{x \rightarrow C}}$ из соотношения (1) и подставив в формулу (4) можно получить значение приведенного электрического поля по данным эмиссионной спектроскопии.

Для однозначного выделения полосы N_2^+ ($\lambda = 391,4$ нм) использовались спектры в неподвижном воздухе. В случае потока (как можно наблюдать на приведенных спектрах Рис.2) сложно выделить полосу из-за наложения непрерывной части спектра, соседних полос. Значения θ рассчитывались для двух спектров, представленных на Рис. 3.

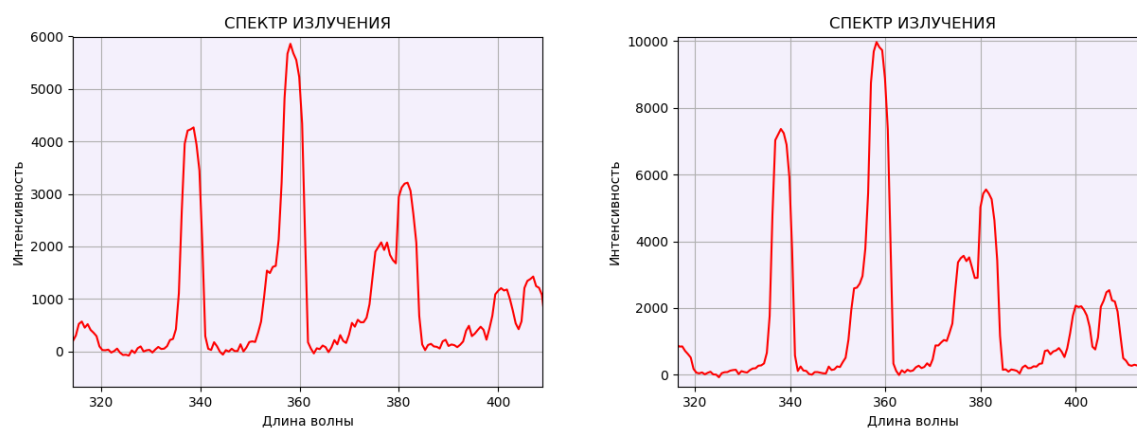


Рис. 3 Эмиссионные спектры в неподвижном воздухе. Слева плотность 0.053 кг/м^3 , справа плотность 0.067 кг/м^3 .

В результате были получены значения приведенного электрического поля $\theta = E/N$: для левого графика 743.9 Тд, для правого графика 801.9 Тд. Расхождение значений может быть объяснено плохо отфильтрованным шумом, так как полоса N_2^+ ($\lambda = 391,4$ нм) очень низкая, а также из-за того, что для спектрометра не была проведена юстировка.