

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЗАВЕРШЁННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ

© 2011 П.Е. Тимченко, А.В. Ивченко, Д.Д. Богданов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 10.03.2011

Сняты спектры незавершённого поверхностного разряда в воздуха при атмосферном давлении. Идентифицированы полосы систем 2^+ , 1^+ и 1^- полос азота. Установлено, что при частоте следования импульсов 8,33 кГц плазма разряда характеризуется локальным равновесием колебательных состояний уровня C^3P_u с температурой $T_{v-C^3P_u} = 2265 \pm 115 \text{ K}$, а состояния, соответствующие 1^+ и 1^- полосам азота, являются термодинамически неравновесными. При сближении электродов уменьшение максимумов интенсивности линий переходов молекулы азота в межэлектродной области начинается с 5-7 мм и 4 мм они сливаются, а при расстоянии 0,5 мм максимум в центральной зоне при заданном уровне напряжения уменьшается, а затем исчезает вовсе. Колебательная температура уровня C на внешней кромке не меняется и находится в пределах погрешности, уровень C является равновесным, в центре же при расстоянии порядка 1 мм наблюдается увеличение колебательной температуры уровня C .
Ключевые слова: эмиссионная спектроскопия, незавершенный поверхностный разряд, плазма.

Успешные эксперименты по снижению аэродинамического трения в присутствии плазмы [1] стимулировали интерес к контролю ее характеристик в приповерхностном газовом потоке. Разряды, создаваемые в молекулярных газах (воздух, азот, кислород и их смеси), приводят к эффективному возбуждению внутренних степеней свободы молекул, диссоциации молекул, наработке активных радикалов и нагреву среды. Возникла задача поиска оптимальных способов создания низкотемпературной плазмы в высокоскоростных потоках газа, изучения влияния газового разряда на газодинамические характеристики потока вблизи обтекаемых поверхностей и выявления механизма развития разряда в высокоскоростном потоке [2, 3]. Уменьшение аэродинамического трения связано со снижением вязкости потока, которое может быть вызвано термодинамически неравновесными процессами в плазме или может быть связано с колебательной и вращательной неравновесностью. Для определения колебательных температур возбужденного газа в неравновесной плазме наиболее приемлемым методом является эмиссионная спектроскопия, обеспечивающая дистанционный контроль при отсутствии возмущений как непосредственно состояния плазмы, так и приповерхностного слоя газа.

*Тимченко Павел Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ассистент.
E-mail: Timravel@mail.ru.*

Ивченко Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: Fgrt@yandex.ru.

*Богданов Данил Дмитриевич, студент.
E-mail: darthgrave@mail.ru.*

Изучение процессов взаимодействия плазмы с газодинамическими потоками важно как с точки зрения фундаментальных исследований механизмов и кинетики атомно-молекулярных превращений при наличии сильных электрических полей и при высоких скоростях течения, так и с точки зрения оптимизации плазмохимических процессов и изменения газодинамических параметров течений. Эксперименты проводились с целью исследования влияния плазменных разрядов друг на друга, их поведения на различном расстоянии и при сближении. Для этого в качестве объекта исследования была выбрана низкоэнергетическая плазма в воздухе атмосферного давления, возбуждаемая на краях металлических электродов высокочастотным током. Исследовались характеристики разряда в двух областях: области на внешней кромки электрода, где нет возмущений, и области между электродами, где происходит взаимодействие полей.

Для решения поставленной задачи был создан экспериментальный стенд, включающий систему возбуждения поверхностного незавершённого разряда в воздухе атмосферного давления и систему регистрации эмиссионных спектров на основе спектрографа Shamrock sr-303i с интегрированной камерой DV-420A.

Схема установки [4, 5] приведена на рис. 1. Структурная схема установки соответствовала и позволяла наряду с регистрацией разрядного тока и напряжения производить спектральную съемку полос разряда в диапазоне длин волн 200-1200 нм. Система электродов была сформирована

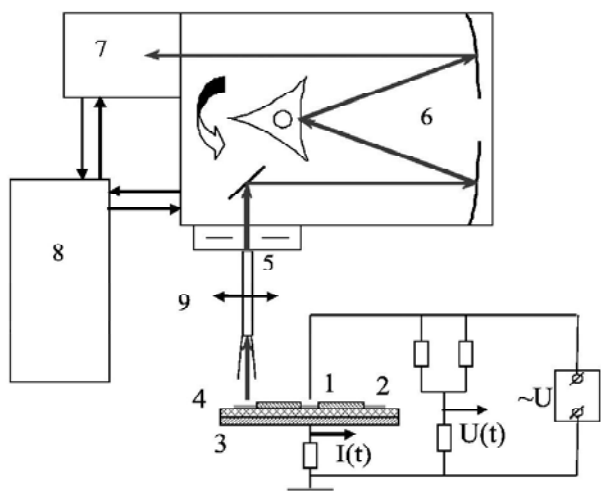


Рис. 1. Схема установки:

1 – электроды, 2 – пластина из диэлектрика, 3 – заземлённый экран, 4 – плазма незавершённого высокочастотного разряда, 5 – приёмное волокно, 6 – спектрограф Shamrock sr-303i, 7 – цифровая камера ANDOR DV-420A-OE, 8 – компьютер, 9 – транспортёр с шаговым двигателем, перемещающий приёмное волокно

на методом травления на противоположных поверхностях фольгированной стеклотекстолитовой диэлектрической подложки 2 толщиной 0,8-1,2 мм и содержала заземленный экран 3 и два высоковольтных электрода 1 длиной 100 мм и шириной 10 мм, разделенных межэлектродным промежутком L . В эксперименте был использован набор электродных систем с близкими геометрическими и электрофизическими параметрами ($\epsilon = 5-6$, $\rho_s = 10^{13}-10^{14}$ Ом [12]), что позволяло изучать свойства разряда только в зависимости от изменения ширины межэлектродного промежутка L . На пластины подаётся высокочастотное напряжение с амплитудой 2-6 кВ и частотой 8,33 кГц. В областях 4 загорается разряд. Контроль режимов горения разряда осуществлялся двухканальным осциллографом PCS1000U с полосой пропускания 60 МГц через делитель напряжения 9 (коэффициент деления 5000:1) и токовый шунт 10 ($R=26$ Ом).

Малоапертурное волокно 5 (апертурный угол $\sim 20^\circ-22^\circ$) располагалось перпендикулярно горизонтальной поверхности электродной системы на расстоянии 15-17 мм и собирало эмиссионное излучение от него. При данной высоте идет диафрагмирование излучения торцом принимающего волновода, что, учитывая изотропный характер эмиссионного излучения, снимает ограничения на точность выставки волокна по углу. Площадь исследуемого пятна $\sim 0,2$ см². Регистрация эмиссионного излучения плазмы проводилась цифровой камерой (разрешение 1024*256 точек размерами 26 мкм², захлаживание матрицы до -60°C), входящей в состав спектрографа (разрешение от 0,2 нм). Сканирование производилось поперёк электродов. Для рассмотрения брались области свободного горения разряда. Исследовались пластины с различным расстоянием между электродами: 1, 2, 4, 8, 20 мм. При сканировании поперёк электродов волокно вместе с держателем перемещалось с помощью транспортёра, приводимого в движение шаговым двигателем. Шаг задавался 0,1; 0,5 или 2 мм. При этом в каждой точке спектр снимался многократно с последующим усреднением. Рассматривались две области: область горения плазмы на внешней кромке электрода (свободное невозмущённое горение) и между электродами (происходит взаимодействие полей одноимённо заряженных зарядов).

На рис. 2а представлен характерный спектр для максимума интенсивности эмиссионного излучения на внешней кромке электрода, данный спектр сохраняется при всех рассмотренных межэлектродных расстояниях. Спектр для максимума интенсивности в межэлектродном промежутке идентичен по форме, но при значениях меньше 1-2 мм в нём появляются изменения, которые хорошо видны на рис. 2б.

В спектре преобладают линии переходом молекулы и иона азота. Наиболее интенсивные линии соответствуют переходам 0-0 (337,1 нм) и 0-1 (357,55 нм) 2⁺-полосы азота

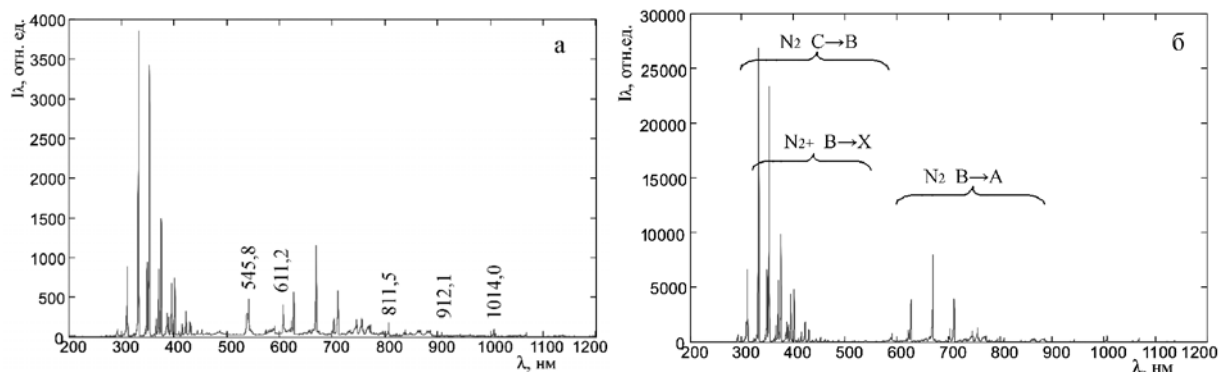


Рис. 2. Эмиссионный спектр излучения разряда внутри межэлектродного промежутка (а) при $L=1$ мм и с внешней кромки электрода (б)

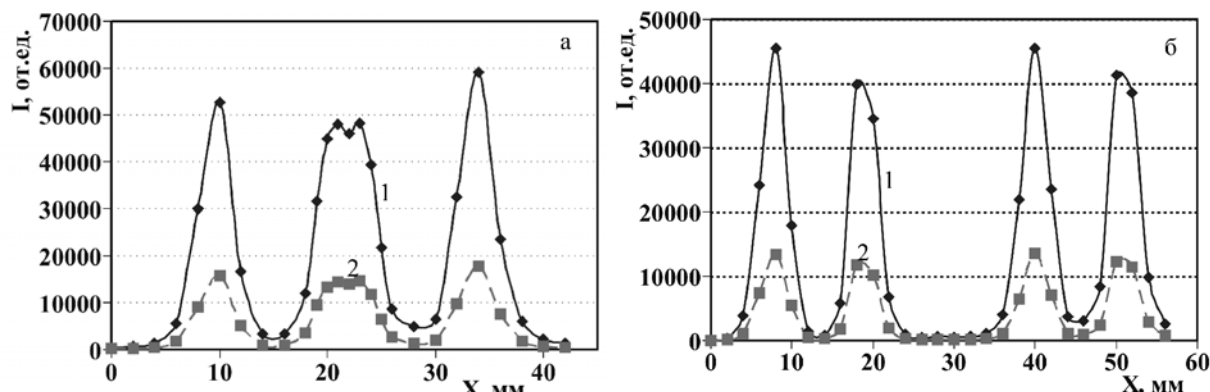


Рис. 3. Зависимость $I(x)$ на длине волны 337 (1) и 674 (2) нм для пластин с расстоянием 20 (а) и 4 мм (б) между электродами

($N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$). Также достаточно сильны линии 0-2(380,39 нм), 1-2(353,62 нм), 1-3(375,51 нм), 0-3(405,84 нм), 1-0(315,84 нм), 1-4(399,84 нм), 1-5(427,02 нм). Часть линий перекрывается из-за вращательного расщепления. Видно, что в процессе разряда в основном возбуждаются первые два колебательных уровня ($v = 0; -1$) электронного состояния $C^3\Pi_u$.

Достаточно сильно в спектре представлены линии аргона, доля которого в воздухе порядка 1%. Наиболее сильные зарегистрированные линии аргона, не испытывающие перекрытий с другими переходами: 811,5; 810,3; 801,5; 912,3; 842,4; 794,8; 826,4; 922,4. Также идентифицированы линии атомарного азота N (939,28; 938,68), атомарного кислорода O (844,62; 844,64; 844,68; 725,415; 725,445; 725,453; 700,223), ионов кислорода O^+ (926,28; 926,6; 777,19; 777,42; 777,54; 615,82) и азота N^+ (868,04; 868,34; 821,63, интенсивность которых существенно меньше ввиду низкой плотности электронов, характерной для незавершенного скользящего разряда. Следует отметить, что линии 1⁻ системы смешивается с линиями 2⁺ системы и за счет существенно меньшей их интенсивности большинство из них теряются на фоне молекулярных линий азота, за исключением переходов: 0-0 (391,14 нм), 0-2(470,62 нм), 0-3(522,51 нм), в отличии, например, от работы [6]. Последнее объясняется достаточно низкой температурой газа и концентрацией электронов в разряде, а, значит, и существенно меньшей концентрацией ионов N_2^+ . Так, для равновесной плазмы в воздухе атмосферного давления согласно [7] характерная концентрация ионов N_2^+ составляет величину порядка $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при концентрации электронов $\sim 5 \cdot 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и температуре газа 700-900К, в то время как для незавершенного поверхностного разряда концентрация электронов составляет $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, температуре газа $\sim 325\text{К}$ и концентрация ионов N_2^+ ниже, чем в работе [6] более чем на 3 порядка.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности на длинах волн 337 и 674 нм для пластин с расстоянием 20 и 4 мм между электродами. Наиболее интересные области разряда на внешних краях электродов (рис. 1) и межэлектродный промежуток. На рис. 3а видно, что в межэлектродном промежутке существуют 2 области разряда, расположенных на некотором промежутке друг от друга, т.к. по интенсивности они практически не отличаются от областей на внешних краях, можно говорить об отсутствии взаимодействия между ними. При сближении электродов уменьшение максимумов межэлектродной области начинается с 5-7 мм и 4 мм они уже сливаются, а при расстоянии 0,5 мм максимум в центральной зоне при заданном уровне напряжения исчезает вовсе. Характер зависимости для других длин волн переходов молекулы азота аналогичен.

Расчёт колебательной температуры [8, 9, 10] уровня С азота (табл. 1) и В производился для 5 разных межэлектродных расстояниях и в 2х точках: на внешней кромке и в центре. Погрешность для большинства экспериментов по уровню 0,95 составляла 95 К.

Как видно, колебательная температура на внешней кромке не меняется и находится в пределах погрешности, уровень С является равновесным, в центре же при расстоянии 1 мм наблюдается увеличение температуры.

Таблица 1. Колебательная температура уровня С азота

L, мм	T, К	
	На внешней кромке	В центральном максимуме
20	2265±106	2256±110
8	2268±112	2281±113
4	2270±111	2265±110
2	2270±115	2236±113
1	2278±110	3364±598

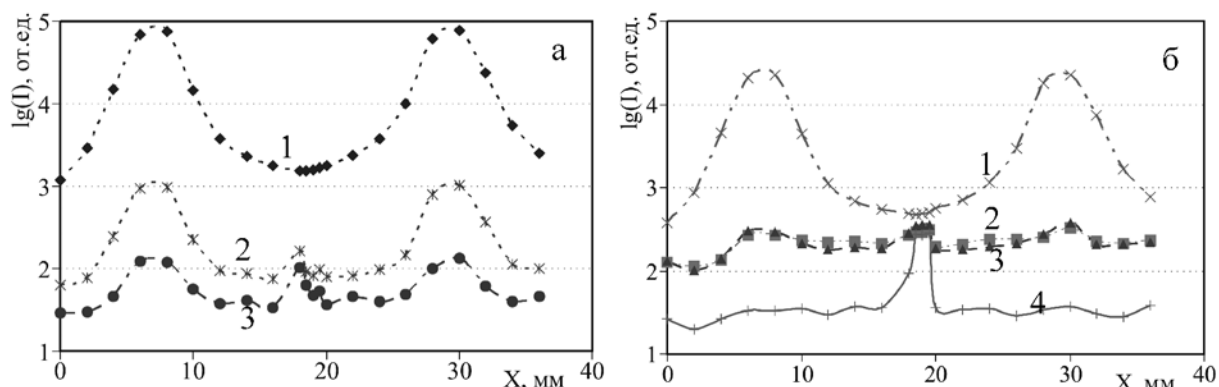


Рис. 4. График зависимости $I(x)$ на длинах волн 337 (а-1), 811.5 (а-2), 1014 (а-3), 674 (б-1), 546 (б-2), 611 (б-3), 912 (б-4) нм для пластины с расстоянием 1 мм между электродами

Спектр определяется распределением электронов по скоростям, а оно обусловлено напряжённостью электрического поля, которое искажается при сближении одноимённо заряженных электродов. Так в спектре на рисунке 26 меняется относительная интенсивность линий, в частности происходит усиление полос в областях 545.8, 611.2, 811.5, 912.1, 1014 нм, что, по-видимому, связано с ослаблением возбуждения молекулярного азота при усилении возбуждения аргона, пространственное распределение интенсивности этих линий дано на рис. 4.

Исследована кинетика плазмы незавершённого поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления при частоте возбуждения 8 кГц: идентифицированы полосы 2^+ , 1^+ и 1^- систем азота для первых 9 колебательных состояний, а также переходы ионов азота, аргона, атомов кислорода и азота. Система полос 1^- значительно слабее переходов молекулы азота в виду достаточно низкой концентрации электронов и температуры газа, а значит и концентрации ионов азота N_2^+ .

Установлено, что при частоте следования импульсов 8 кГц плазма разряда характеризуется локальным равновесием колебательных состояний уровня $C^3\Pi_u$ с температурой $T_{v-C^3\Pi_u} = 2265 \pm 115 K$ ($P=0,95$), а состояния, соответствующие 1^+ и 1^- полосам азота, являются термодинамически неравновесными.

При сближении электродов уменьшение максимумов интенсивности линий переходов молекулы азота в межэлектродной области начинается с 5-7 мм и 4 мм они сливаются, а при расстоянии 0,5 мм максимум в центральной зоне при заданном уровне напряжения уменьшается, а затем исчезает вовсе. Колебательная температура на внешней кромке не меняется и находится в пределах погрешности, уровень C является равновесным, в центре же при расстоянии 1 мм наблюдается увеличение температуры.

В спектре центральной межэлектродной зоны при малых расстояниях (~1мм) меняется

относительная интенсивность линий, в частности происходит усиление полос в областях 545.8, 611.2, 811.5, 912.1, 1014 нм, что, по-видимому, связано с ослаблением возбуждения молекулярного азота при усилении возбуждения аргона.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 - 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M. SDBD plasma enhanced aerodynamics; concepts, optimization and applications / Progress in Aerospace since. 2007. V.43 P.193-217.
2. Fomin V.M., Tretyakov P.K., Taran J.P. Flow control using various plasma and aerodynamic approach // Aerospace since & technology. 2004. V.8. Pp.411-421.
3. Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А. Обтекание вязким потоком газа плазменного листа, образованного скользящим разрядом // ТВТ. 2002. Т.40, № 3. С.515-526.
4. Ивченко А.В., Захаров В.П., Тимченко П.Е. Исследование пространственных характеристик незавершённого поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления // Успехи физики. 2009. Т.11. С.18-24.
5. Ивченко А.В., Захаров В.П., Тимченко П.Е. Определение характеристик незавершённого поверхностного разряда в воздухе на основе анализа эмиссионных спектров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. №4. С.101-108.
6. Бычков В.Л., Васильев М.Н., Зуев А.П. Экспериментально-теоретическое исследование свойств приповерхностных электронно-пучковой плазмы азота // Теплофизика высоких температур. 1994. Т.32. №3. С. 323-333.
7. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006. 472 с.
8. Хьюберг Г., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. Часть 2. М.: Мир, 1984. 368 с.
9. Кузьменко Н.Е., Кузнецова Л.А., Кузяков Ю.Я. Факторы Франка-Кондона двухатомных молекул. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1984. 344 с.
10. Zare R.N., Larson E.O., Berg R.A. Franc-Condon factors for electric band system of molecular nitrogen // J. Molec. Spectr. 1965. V.15. P.117-139.

**INFLUENCE OF INTERACTION OF ELECTRODES ON CHARACTERISTICS
OF INCOMPLETE SURFACE DISCHARGE IN AIR ON THE BASIS
OF EMISSION SPECTRA ANALYSIS**

© 2011 P.E. Timchenko, A.V. Ivchenko, D.D. Bogdanov

Samara State Aerospace University

Spectra of the incomplete surface discharge in air at atmospheric pressure experimentally determined. Emission bands of nitrogen 2^+ , 1^+ and 1^- systems are identified. It is shown, that the discharge plasma at pulse frequency impact of 8,33 kHz is characterized by local vibration equilibrium of electronic state with temperature, and the states corresponding to 1^+ and 1^- systems of nitrogen remain thermodynamic nonequilibrium. At rapprochement of electrodes reduction of maxima of lines intensity of nitrogen molecule transitions in interelectrode area begins about 5-7 mm and 4 mm they merge, and at distance of 0,5 mm the maximum in the central zone at the set voltage level decreases, and then disappears at all. The oscillatory temperature of a level C on an external edge does not vary and is within the limits of an error, the level C is equilibrium, in the center at distance about 1 mm the increase in oscillatory temperature of a level C is observed.

Key words: emission spectra analysis, incomplete surface discharge, plasma.

*Pavel Timchenko, Candidate of Physics and Mathematics,
Chief Research Fellow, Assistant Lecturer.*

E-mail: Timpavel@mail.ru.

Alexey Ivchenko, Candidate of Technics, Associate Professor.

E-mail: Fgrt@yandex.ru.

Danil Bogdanov, Student. E-mail: darthgrave@mail.ru.