

Исследование протекания тока в плазменной струе атмосферного давления в воздухе

*В.О. Нехорошев**, *Н.В. Ландль*, *Ю.Д. Королев*, *А.В. Болотов*, *О.Б. Франц*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**nvo@lnp.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Работа направлена на изучение механизма переноса тока в струе, формирующейся на выходе из электродной системы коаксиального плазмотрона на основе тлеющего разряда в потоке воздуха. Определен диапазон условий, когда разряд поддерживается в квазистационарном режиме. С использованием специального диагностического электрода экспериментально определен потенциал на поверхности положительного столба разряда и выполнены оценки электрического поля в промежутке между положительным столбом и диагностическим электродом. Для интерпретации полученных данных предложена модель, описывающая перенос тока в диагностической системе. Показано, что вблизи поверхности столба достигается электрическое поле до 10 кВ/см и эффективное давление на уровне 100 Тор. В таких условиях приведенная напряженность электрического поля значительно превышает 40 В/см·Тор, что приводит к формированию области с ионизационным размножением носителей заряда. Показано, что при расстоянии между областью плазмы и диагностическим электродом в 5 мм, протяжённость области с ионизацией в направлении потока газа может достигать 0.3 мм. Перенос тока в основной части струи осуществляется в режиме дрейфа носителей заряда.

Ключевые слова: плазма, тлеющий разряд, разряд в потоке газа, ионизация, разряд при атмосферном давлении, плазмотрон, плазменная струя, положительный столб, низкотемпературная плазма.

1. Введение

В настоящее время все большее внимание привлекают плазменные струи на основе разрядов атмосферного давления [1–10]. В особенности, растет интерес к низкотемпературным плазменным струям, получаемым при атмосферном давлении, ввиду возможности их применения в технике [1, 2, 5], медицине [1, 2], для плазменного инициирования и поддержания химических реакций [1, 2, 5–7] и т.д.

Типичными примерами газоразрядных систем, используемых для получения разряда в потоке газа и плазменных струй, являются так называемые “скользящая дуга” и коаксиальный плазмотрон, электроды которых сконструированы так, чтобы пропускать газ-носитель через область разряда [1, 2, 8–10]. Таким образом, на выходе из системы электродов образуется поток нагретого и слабо ионизированного газа, так называемая “плазменная струя” [1–5]. Данная работа посвящена исследованию тлеющего разряда атмосферного давления в потоке газа и характеристике электрического тока, проходящего через объем струи на выходе из коаксиального плазмотрона.

В работах [3, 9] был предложен метод диагностики струи на выходе плазмотрона с использованием системы специальных диагностических электродов. Было показано, что при отрицательной полярности напряжения на потенциальном электроде газоразрядной системы основная доля тока в струе переносится электронами, которые движутся в режиме дрейфа под действием электрического поля в струе. При этом положительный столб разряда играет роль плазменного катода. Величина тока в струе определяется электрическим полем между столбом разряда и диагностическим электродом, которое зависит от напряжения горения разряда, геометрии системы и пространственного положения столба.

При положительной полярности напряжения, прикладываемого к потенциальному электроду плазмотрона, столб разряда является плазменным анодом, в то время как диагностический электрод выполняет функцию дополнительного катода [9]. В этом случае

механизм переноса тока через струю изучен недостаточно. Настоящая работа направлена на исследование разряда в потоке газа и диагностику струи для условий, когда внутренний электрод плазмотрона находится под положительным потенциалом. Методика диагностики струи заключается в определении температуры, электрического поля в струе и измерении электрического тока через струю. Для интерпретации экспериментально полученных данных предложена модель, описывающая механизм переноса тока в струе для случая положительной полярности напряжения на потенциальном электроде плазмотрона.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1. Разряд поддерживается в электродной системе, соответствующей коаксиальному плазмотрону, включающему в себя потенциальный электрод 1 и сопло плазмотрона 2. Электрод 1 (анод) изготовлен из меди, сопло плазмотрона (катод) выполнено из нержавеющей стали. Струя генерировалась при средних токах тлеющего разряда до 200 мА, массовом расходе воздуха до 1 г/с и положительной полярности источника питания V_0 .

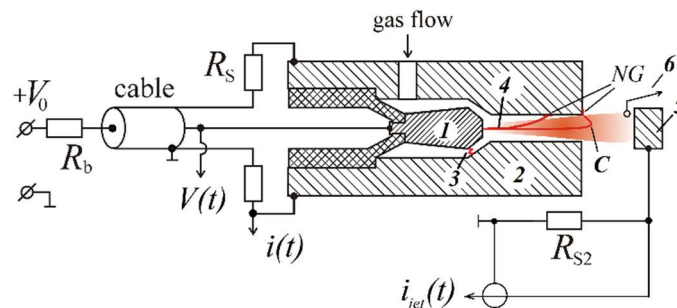


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки с дополнительным электродом для регистрации тока через струю. 1 – анод, 2 – катод (сопло), 3 – положение первого пробоя, 4 – положительный столб, 5 – дополнительный электрод, 6 – термопара с измерителем температуры, NG – место положения области отрицательного свечения на электроде, V_0 – напряжение источника питания, R_b – балластный резистор, R_S , R_{S2} – резисторы для измерения тока. Длина сопла плазмотрона: 10 мм, диаметр выходного отверстия сопла – 5 мм.

Постоянное напряжение положительной полярности $V_0 \leq 5$ кВ от источника питания подается на электроды плазмотрона через коаксиальный кабель и балластный резистор $R_b = 20$ кОм. При повышении напряжения на газоразрядном промежутке происходит первый пробой по кратчайшему расстоянию (около 0.6 мм) между электродами плазмотрона. В результате пробоя формируется канал искрового разряда, схематично показанный на рисунке как позиция 3. Далее, поскольку ток разряда ограничен балластным резистором, искровой разряд переходит в разряд типа тлеющего. Под действием потока газа столб разряда 4 изгибается и, удлиняясь, смещается в направлении выходного отверстия сопла, после чего принимает несимметричную форму с изгибом в окрестности точки С. При этом область отрицательного свечения располагается на торце сопла плазмотрона 2. Далее может либо произойти новый пробой внутри электродной системы, и цикл скольжения разряда в потоке газа повторится, либо положение разряда установится и разряд в потоке газа будет поддерживаться в квазистационарном режиме.

Особенностью рассматриваемой экспериментальной установки является использование дополнительного электрода 5 для измерения тока через струю и термопары 6 для измерения температуры газа в струе. Дополнительный электрод 5 представляют собой стальной стержень диаметром 4 мм помещенный в стеклянную трубку с внутренним диаметром 4.1 мм. Плоскость диагностического электрода размещалась на расстоянии 5 мм от сопла

плазмотрона. Температура нейтрального газа T_{jet} на выходе из сопла плазмотрона измеряется с помощью термометра ТМ902С и термопары, размещенной на удалении 1 мм от поверхности диагностического электрода.

Параметры разряда и ток через струю на дополнительный электрод измерялись методом осциллографии. Резистор для измерения тока разряда $R_S = 1$ Ом. В качестве шунта для измерения тока через струю использовался резистор $R_{S2} = 1$ МОм. С помощью осциллографа Tektronix MDO43 регистрировался ток $i(t)$ и напряжение горения разряда $V(t)$, а также ток $i_{jet}(t)$, протекающий через объем плазменной струи на диагностический электрод 5. В ходе эксперимента потенциал в области плазмы разряда ϕ_{jet} измерялся путем размещения диагностического электрода на расстоянии менее 1 мм до положительного столба и непосредственной регистрации падения напряжения на внутреннем сопротивлении высоковольтного пробника $R_{S2} = 900$ МОм с помощью осциллографа.

3. Результаты и обсуждение

Осциллограммы напряжения горения разряда, тока разряда и через струю совместно с фотографией разряда на выходе из сопла плазмотрона приведены на Рис. 2а. Когда положительный столб движется внутри электродной системы плазмотрона, электрическое поле вблизи диагностического электрода мало и ток на него практически не регистрируется. Значительный сигнал $i_{jet}(t)$ наблюдается, когда положительный столб находится в непосредственной близости от выходного отверстия сопла плазмотрона или же выходит за пределы электродной системы в окружающее пространство [3, 9]. В работе [9] было предложена методика диагностики струи, которая подразумевает получение квазистационарного режима работы плазмотрона. В этом случае возможно достоверное измерение температуры газа в струе, а также определение положения положительного столба разряда в пространстве по фотографии. В рассматриваемых условиях, при среднем токе разряда (70–120) мА такой режим достигается в диапазоне массовых расходов воздуха (0.08 – 0.20) г/с и с соплом плазмотрона длиной не более 15 мм. При этом положительный столб разряда выходит за пределы сопла плазмотрона, изгибается, и некоторое время поддерживается в потоке газа, как показано на фотографии (Рис. 2б) и схематично изображено на Рис. 1 (позиция 4). Фактически, часть положительного столба разряда находится внутри сопла плазмотрона, а часть – в струе за пределами электродной системы.

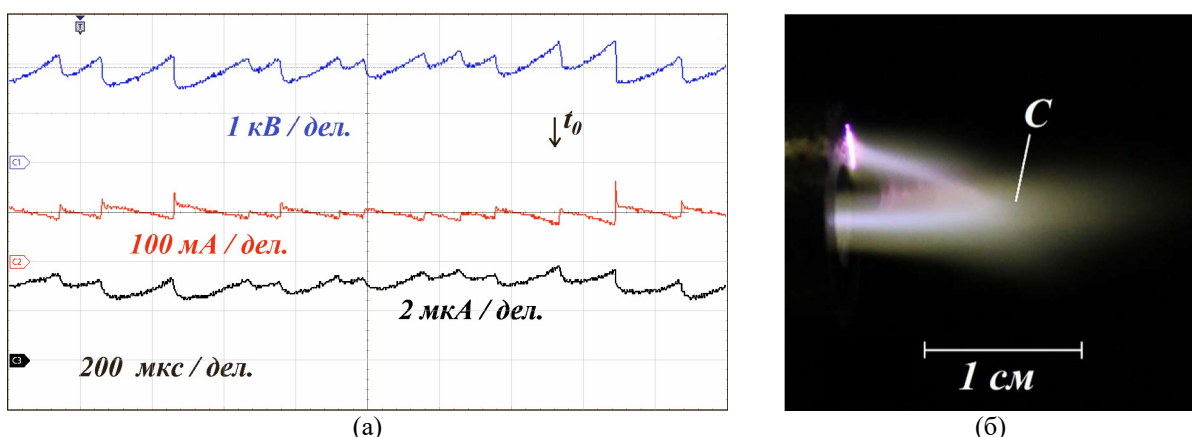


Рис. 2. Осциллограммы (а) тока разряда $i(t)$, напряжения горения разряда $V(t)$ и тока на диагностический электрод $i_{jet}(t)$ совместно с фотографией разряда на выходе из сопла плазмотрона (б).

Из осциллограмм (Рис. 2а) видны осцилляции тока и напряжения горения разряда, обусловленные периодическим изменением длины столба разряда и повторными пробоями.

Ток разряда при повторных пробоях изменяется от 80 мА до 120 мА, напряжение горения разряда от 2.4 кВ до 1.6 кВ, что связано с изменением длины положительного столба. В условиях эксперимента, при повторном пробое длина столба уменьшается на величину не более 9 мм. Для дальнейшей интерпретации полученных экспериментальных данных будем рассматривать крайнее положение столба перед повторным пробоем, которому соответствует момент времени t_0 . Длина столба разряда от места привязки разряда на катоде до области перегиба вблизи точки C составляла 9 мм. Расстояние между точкой C и диагностическим электродом составляло $l = 5$ мм.

Фактически, в ходе эксперимента зафиксировано протекание малой доли тока разряда через струю газа на дополнительный электрод. На осциллограмме тока $i_{jet}(t)$ наблюдаются пульсации тока на диагностический электрод 5, однако сигнал практически непрерывный. Резкое изменение тока через струю при повторном пробое не отображено на осциллограмме ввиду наличия емкостей диагностического электрода (около 10 пФ) и измерительного пробника (115 пФ). Постоянная времени измерительного тракта при $R_{S2} = 1$ МОм составляет приблизительно 125 мкс, что сопоставимо со средним периодом пульсаций тока. В этом случае можно говорить о регистрации усредненного значения тока через струю. Амплитуда тока $i_{jet} = 4$ мкА и температура газа в струе $T_{jet} = 800$ К соответствуют расстоянию 5 мм от поверхности столба разряда до диагностического электрода.

В предшествующих работах [8, 9] интерпретация результатов проводилась в предположении, что поле в промежутке практически однородно, или в некоторой степени искажается пространственным зарядом частиц в струе. В рамках данной работы предлагается более детально рассмотреть распределение электрического поля в промежутке между областью плазмы разряда и дополнительным диагностическим электродом. Необходимость детального рассмотрения возникает в связи с тем, что в сравнении с размерами электродов, столб разряда имеет относительно небольшой диаметр, на уровне $D_{PC} = (0.4-0.5)$ мм [10]. В этом случае распределение потенциала в промежутке оказывается существенно неоднородно, и вблизи поверхности положительного столба происходит концентрация силовых линий электрического поля. Если достигается величина приведенного поля E/p_{eff} выше пороговой, то в некоторой области вблизи поверхности столба будут протекать процессы ионизационного размножения носителей заряда, что необходимо учитывать при рассмотрении процессов переноса тока в струе и интерпретации экспериментально полученных данных. Рисунок, схематично отражающий положение электродов и столба разряда изображен ниже (Рис. 3).

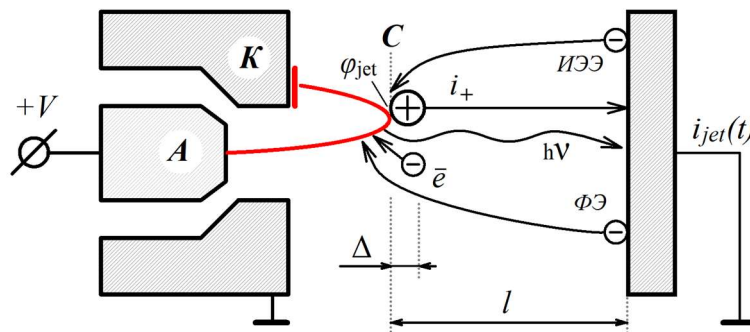


Рис. 3. Изображение системы электродов и областей разряда к рассматриваемой модели. A – анод плазматрона, K – катод (сопло), C – место перегиба столба разряда, l – расстояние между точкой C и диагностическим электродом, i_+ – ток ионов, $h\nu$ – поток фотонов, ИЭЭ – ток ион-электронной эмиссии, ФЭ – ток фотоэлектронов, Δ – протяженность области с ионизационным размножением.

В предлагаемой модели положим, что за счёт диффузии электроны и ионы могут покидать поверхность положительного столба разряда. Кроме того, возможна ионизация газа за счёт

поглощения потока фотонов, излучаемых из области плазмы разряда, фотоэлектронная и потенциальная ион-электронная эмиссия с поверхности диагностического электрода. Таким образом, заряженные частицы оказываются в пространстве между областью плазмы разряда и диагностическим электродом.

Поскольку потенциал области плазмы отличен от нуля, в пространстве между диагностическим электродом и областью плазмы возникает электрическое поле. При положительной полярности напряжения источника питания V_0 область плазмы разряда находится под положительным потенциалом φ_{jet} относительно заземленного диагностического электрода. В данных условиях положительные ионы движутся в направлении сопла плазматрона и диагностического электрода, в то время как ток электронов и отрицательных ионов замыкается на поверхность положительного столба.

Для определения величины поля в промежутке между диагностическим электродом и областью плазмы, прежде всего, необходимо знать потенциал поверхности, с которой течет электрический ток. В ходе эксперимента было выявлено, что при положительной полярности на потенциальном электроде плазматрона потенциал области плазмы вблизи точки C достигает $\varphi_{jet} = 850$ В. Грубо напряженность поля вблизи поверхности столба можно оценить, используя формулу для напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженной сферы: $E_m = 2\varphi_{jet}/D_{PC}$. При потенциале области плазмы 800 В, напряженность электрического поля у сферической поверхности радиусом 0.25 мм превышает 30 кВ/см. Эта оценка завышена, тем не менее, она показывает, что поле вблизи поверхности положительного столба может быть на порядок выше усреднённого значения [9].

Уточнить оценки можно используя формулу для напряженности электрического поля в системе концентрических цилиндров, принимая радиус R внешнего цилиндра приблизительно равным расстоянию между точкой C и диагностическим электродом l , а радиус внутреннего цилиндра r равным радиусу положительного столба разряда $D_{PC}/2$. В этом случае, напряженность электрического поля максимальна вблизи поверхности столба и находится как $E \approx E_m / \ln(R/r)$. В рассматриваемых условиях $\ln(R/r) \approx 3$ и электрическое поле у поверхности столба может достигать 10 кВ/см.

Чтобы оценить E/p_{eff} в струе необходимо знать эффективное давление в рассматриваемой области. В эксперименте [9], при потоке воздуха 0.1 г/с, на расстоянии $l \approx 4$ мм температура газа в струе не превышает 800 К, что соответствует эффективному давлению около 280 Тор. В то же время, в столбе разряда при токе 100 мА эффективное деление оценивалось на уровне 100 Тор [10]. Таким образом, оценка приведенной напряженности электрического поля у поверхности положительного столба дает величину на уровне $E/p_{eff} = 100$ В/см·Тор. Для ударной ионизации в воздухе необходимо $E/p_{eff} > 40$ В/см·Тор [10], следовательно, вблизи поверхности положительного столба формируется область с ионизационным размножением носителей заряда.

Поскольку электрическое поле и температура газа спадают по мере удаления от столба, на некотором расстоянии Δ от поверхности столба приведенное поле E/p_{eff} оказывается меньше порогового значения. В соответствии с оценками, на расстоянии $\Delta = 0.3$ мм от границы столба приведенная напряженность поля E/p_{eff} будет сопоставима с пороговым значением. Следовательно, далее ток через струю протекает в режиме дрейфа носителей заряда.

4. Выводы

В ходе эксперимента определен потенциал области плазмы в месте перегиба положительного столба разряда в потоке воздуха. При положительной полярности на потенциальном электроде плазматрона потенциал области плазмы достигает 850 В. На основе

полученных данных оценена величина электрического поля вблизи положительного столба тлеющего разряда в потоке воздуха на уровне 10 кВ/см. При этом, приведенное электрическое поле в области перегиба столба значительно превышает 40 В/см·Тор, что достаточно для ионизации газа электронным ударом. При расстоянии между областью плазмы и диагностическим электродом в 5 мм, протяжённость области с ионизацией в направлении потока газа может достигать 0.3 мм, далее ток через основную часть струи протекает в режиме дрейфа носителей заряда.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FWRM-2021-0007.

5. Список литературы

- [1] Y.S. Akishev, Non-thermal plasma at atmospheric pressure and its opportunities for applications, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved., Khim. Khim. Tekhnol.*, **62**(8), 20, 2019; doi: 10.6060/ivkkt.20196208.5908
- [2] V. Gamaleev, N. Iwata, M. Hiramatsu, and M. Ito, Tuning of operational parameters for effective production of nitric oxide using an ambient air rotating glow discharge jet, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. **59**(SH), 2020; doi: 10.35848/1347-4065/ab72c9
- [3] N.V. Landl, V.O. Nekhoroshev, Y.D. Korolev, O.B. Frants, and V.S. Kasyanov, A study of the plasma jet formed by the glow discharge in an air flow in the electrode system of a gliding arc, *Russ. Phys. J.*, vol. **67**(1), 78, 2024; doi:10.1007/s11182-024-03091-7
- [4] M.P. Bulat, P.V. Bulat, P.V. Denissenko, I.I. Esakov, L.P. Grachev, P.V. Lavrov, K.N. Volkov, and I.A. Volobuev, Plasma-assisted ignition and combustion of lean and rich air/fuel mixtures in low- and high-speed flows, *Acta Astronautica*, vol. **176**(760), 700, 2020; doi: 10.1016/j.actaastro.2020.04.028
- [5] Y. Akishev, G. Aponin, A. Petryakov, and N. Trushkin, On the composition of reactive species in air plasma jets and their influence on the adhesion of polyurethane foam to low-pressure polyethylene, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**(27), 274006, 2018; doi: 10.1088/1361-6463/aac5fd
- [6] C.V. Wang, B.W. Wang, S.Z. Liu, and J.J. Zou, Hydrogen production via partial oxidation reforming of methane with gliding arc discharge plasma, *Chemistryselect*, **5**(44), 13781, 2020; doi: doi.org/10.1002/slct.202002890
- [7] Y.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, V.G. Geyman, and A.I. Suslov, Parameters of a positive column in a gliding glow discharge in air, *Phys. Plasmas*, vol. **24**(10), 103526, 2017; doi: 10.1063/1.5003141
- [8] N.V. Landl, V.O. Nekhoroshev, Y.D. Korolev, O.B. Frants, and V.S. Kasyanov, Study of the Plasma Jet Formed by the Glow Discharge in an Air Flow at the Positive Polarity of the Potential Electrode of a Low-Current Coaxial Plasmatron, *Plasma Phys.*, vol. **66**(7), 792, 2023; doi: 10.1007/s11182-023-03007-x
- [9] Y.D. Korolev, O.B. Frants, V.O. Nekhoroshev, A.I. Suslov, V.S. Kas'yanov, I.A. Shemyakin, and A.V. Bolotov, Simulation of nonstationary phenomena in atmospheric-pressure glow discharge, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **42**(6), 592, 2016; doi: 10.1134/S1063780X16060052
- [10] Y. Korolev and G. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases*. Yekaterinburg: UrB RAS, 1998.