

Электронные и ионные пучки

УДК 537.523.9

Новый подход к получению направленных потоков заряженных и нейтральных частиц в газе, основанный на эффекте "электрического ветра"

С. В. Небогаткин, Р. Р. Хасая, В. Ю. Хомич, В. А. Ямщиков

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: yamschikov52@mail.ru

Рассмотрен новый подход к получению "электрического ветра" (ЭВ) в газе, основанный на использовании высокочастотного барьерного разряда. Создан плазменный эмиттер ионов, служащий источником ЭВ. Разработана электрическая схема для формирования ЭВ, исследованы ее электроразрядные и газодинамические характеристики. В условиях атмосферного воздуха на площади около 80 см² скорость потока превышала 1 м/с, величина потока составляла более 7 л/с.

PACS: 41.75.-i

Введение

Явление ЭВ, иногда называемое "ионным ветром" (ИВ), известно более 100 лет. Оно представляет собой коллективное движение газа, возникающее в результате образования потока ионов, дрейфующих в поле коронного разряда и передающих свой импульс нейтральным компонентам газовой среды при столкновениях [1, 2].

Эффект ЭВ традиционно применяется в аппаратах электрон-ионных технологий: электрофильтры для очистки газовых сред, устройства для электропокраски и нанесения пленочных покрытий на поверхность материалов [1, 2].

В последние годы интерес к исследованию явления ЭВ резко возрос, что обусловлено появлением новых областей, в которых возможно его использование. В космосе электростатические поля и ЭВ применяются для сдува пузырей с фильтрующих сеток топливных каналов, в разработках электроракетных двигателей, при создании безлпаточных электро- и гидронасосов [3]. Выявлены уникальные возможности ЭВ для управления аэродинамическими потоками вблизи поверхности крыльев при полете самолетов [4—6].

В конце 2007 г. сотрудники университета Пардью (США) совместно с корпорацией Intel разработали так называемую технологию ИВ, которая позволяет эффективно охлаждать микросхемы. Ожидается, что ее использование в сочетании с применением традиционных вентиляторов даст возможность на 250 % увеличить интенсивность отвода тепла от микропроцессоров [7—9].

Особо следует выделить системы электрической прокачки газа, работа которых также основа-

на на эффекте ЭВ. В ряде применений, затрудняющих или исключаящих использование электромеханических вентиляторов, системы электрической прокачки могут служить их альтернативой.

К достоинствам систем электрической прокачки относятся: небольшие габаритные размеры и масса; отсутствие движущихся и трущихся деталей, вызывающих повышенный шум и вибрацию; вакуумная чистота, которая особенно важна для защиты окружающей среды при прокачке агрессивных газовых сред [10—16].

Тем не менее возможности применения ЭВ в мощных электрофизических устройствах и промышленных технологических установках остаются весьма ограниченными. Причиной этого является низкая мощность коронного разряда, обусловленная малой площадью поверхности коронирующих электродов, и переходом коронного разряда в искровой разряд при повышении тока коронны [11—16].

В работах [13, 14] исследовались предельные характеристики многоострийного коронного разряда и формируемые в этих условиях потоки ЭВ. Было показано, что значения скорости и величины потока определяются величиной приложенного напряжения. При напряжении на разрядном промежутке 30 кВ значения величины скорости и потока в воздухе, соответствующие предельным режимам горения коронного разряда, составили 4,5 м/с и 2—3 л/с, соответственно.

Системы электрической прокачки, использующие коронный разряд, находят применение в малогабаритных отпаянных лазерах, возбуждаемых импульсно-периодическим газовым разрядом [10—12]. Однако при столь высоких напряжениях

и близких к предельным токам усложняется конструкция, возникает повышенная эрозия коронирующих электродов, что снижает надежность работы лазера. Кроме того, для прокачки рабочих смесей в мощных электроразрядных лазерах требуются более высокие газовые потоки.

В работе [16] впервые было предложено заменить коронный разряд на более мощный высокочастотный барьерный разряд. При этом питание барьерного разряда и потока ионов, дрейфующих во внешнем электрическом поле, может осуществляться независимо друг от друга.

Цель настоящей работы — экспериментальная реализация этого нового подхода к получению ЭВ; исследование процесса его формирования, а также определение электроразрядных и скоростных характеристик потока заряженных и нейтральных частиц в газе.

Плазменный эмиттер ионов с высокочастотным барьерным разрядом, распределенным по поверхности диэлектрика

Для создания потока ЭВ необходим эффективный источник ионов, поэтому авторами был разработан плазменный эмиттер ионов, питаемый стационарным барьерным разрядом, распределенным по поверхности диэлектрика из керамики.

Схема эмиттера показана на рис. 1. Его конструкция состояла из двух одинаковых трубок 1 из керамики (Al_2O_3) диаметром 10 мм и длиной 30 см. Трубки закрепляли параллельно одна другой на раме из оргстекла. Расстояние между осями трубок составляло 15 мм. Внутри керамических трубок вставлялись медные трубки 2, служившие внутренними электродами. Внешними электродами являлись два медных желоба 3 длиной 20 см. Высокочастотное напряжение питания эмиттера $U_g = (5—15)$ кВ прикладывалось между внутренними и внешними электродами, при этом на поверхности трубки возникал плазменный слой газового разряда 4. Ток между внешним и внутренним электродами замыкался благодаря току разряда, текущему в плазменном слое, и току смещения через керамический диэлектрик. Чтобы усилить разрядный ток, а также более равномерно распределить его по поверхности керамики, на трубки и желоб наматывалась медная проволока 5 диаметром 0,5 мм. Для сравнения на одной трубке шаг намотки составлял 10, а на другой 5 мм. Применение трубок с диэлектриком из оксидной керамики обусловлено высокими показателями теплопроводности, электрической прочности и химической стойкости этого материала, что необходимо для эффективной и надежной работы эмиттера в условиях химически активных газовых сред. Выде-

лавшееся при работе эмиттеров тепло отводилось водой, протекавшей через медные трубки 2.

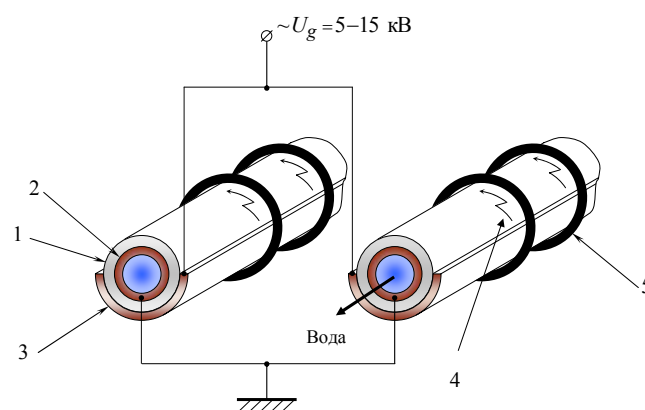


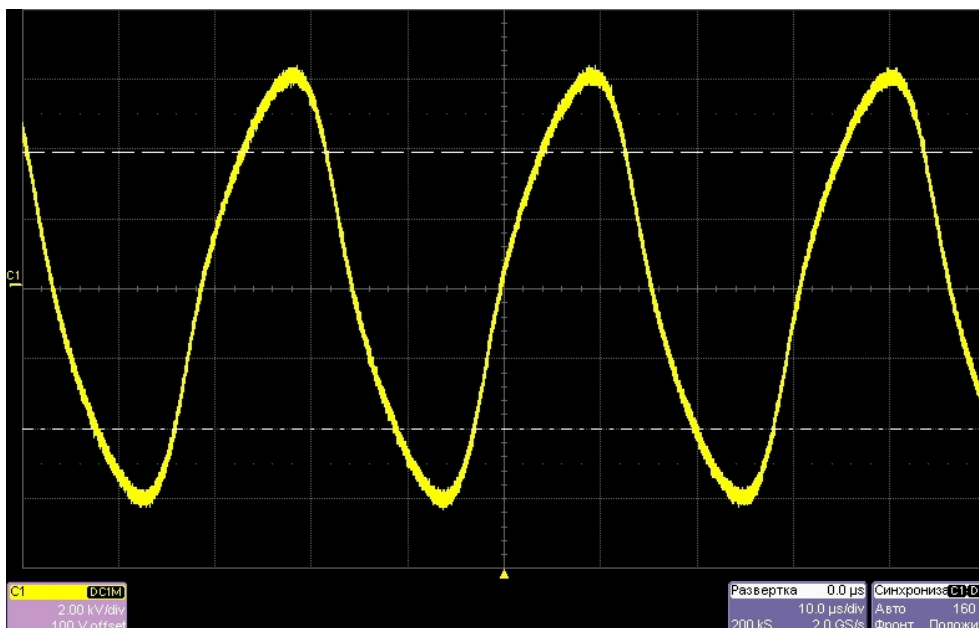
Рис. 1. Схема плазменного эмиттера на основе высокочастотного барьерного разряда

Процесс горения барьерного разряда на поверхности эмиттеров поддерживался специально разработанным высокочастотным генератором высокого напряжения (ВГВН), который имел следующие выходные параметры: переменное напряжение 5—15 кВ, диапазон перестройки частоты следования 30—50 кГц, средняя мощность 300 Вт.

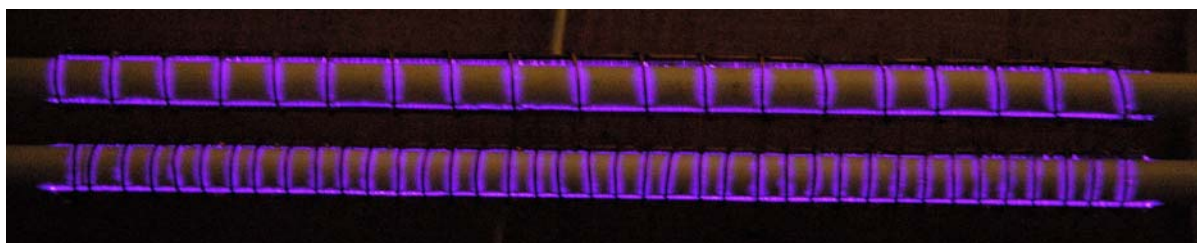
На рис. 2, а изображена типичная осциллограмма напряжения питания эмиттера: амплитуда напряжения на электродах $U_g = 12$ кВ, период изменения напряжения $T = 30$ мкс. На рис. 2, б представлена фотография свечения высокочастотного барьерного разряда, стационарно горящего на поверхности обеих трубок в атмосферном воздухе. Видно, что наиболее яркое свечение плазмы наблюдается вблизи кромок электродов. В случае намотки провода с шагом 5 мм (нижний эмиттер) разрядная плазма более равномерно распределена по рабочей поверхности трубки площадью $S \approx 30$ см², чем при шаге намотки 10 мм.

При увеличении U_g площадь свечения барьерного разряда увеличивалась. В диапазоне изменения $U_g = 5—15$ кВ горение разряда имело устойчивый диффузный характер без появления стримерных каналов. Высокие однородность и устойчивость барьерного разряда обусловлены тем, что он контролируется током смещения, протекающим через достаточно равномерно распределенную емкость электродной системы.

При изменении напряжения U_g , подаваемого на трубки, от 5 до 10 кВ полный ток барьерного разряда изменялся в пределах 60—90 мА. Средняя плотность тока разряда на единицу поверхности эмиттера при частоте питания около 30 кГц составляла 1,5—2,5 мА·см⁻², что значительно выше значений, достигаемых при использовании коронного разряда [11, 12, 16].



а



б

Рис. 2. Процесс горения барьерного разряда на поверхности эмиттеров:

а — сциллограмма напряжения питания плазменного эмиттера ионов: по вертикали 2 кВ/дел, по горизонтали 10 мкс/дел; б — фотография свечения эмиттера ионов с барьерным разрядом, горящим на поверхности диэлектрических трубок

Экспериментальная установка и характеристики электрического ветра

В экспериментах по получению ЭВ и измерению его характеристик применялась электрическая схема, изображенная на рис. 3. Над трубками эмиттера располагалась металлическая сетка 5 с прозрачностью $\sigma = 0,7$. Высота d от сетки до поверхности эмиттера варьировалась в пределах 17—22 мм. Через ограничительное сопротивление $R = 110$ кОм к сетке прикладывалось постоянное напряжение смещения $U_0 = 0—22$ кВ положительной или отрицательной полярности от высоковольтного источника (ВИ). Между эмиттером и сеткой появлялось внешнее электрическое поле, которое вытягивало заряженные частицы из плазмы барьерного разряда. Под действием поля положительные или отрицательные ионы двигались в сторону сетки, вызывая движение нейтральных частиц — ЭВ. Ионный ток I , протекающий между эмиттером и сеткой, регистрировался микроамперметром.

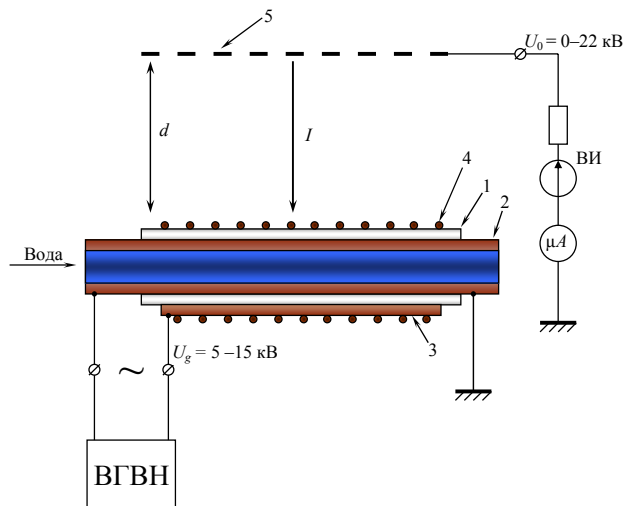


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 — трубки из керамики (Al_2O_3); 2 — медные трубки (внутренние электроды); 3 — медные желоба (внешние электроды); 4 — медная проволока; 5 — металлическая сетка; ВГВН — высокочастотный генератор высокого напряжения; U_g — высокочастотное напряжение; U_0 — напряжение смещения; ВИ — высоковольтный источник; μA — микроамперметр; R — ограничительное сопротивление; d — высота между сеткой и эмиттером; I — ток ионов

Под воздействием внешнего поля между эмиттером и сеткой возникает ионный ток, что подтвердилось измерением вольт-амперных характеристик (ВАХ). Зависимости I от U_0 при разных значениях d изображены на рис. 4. Видно, что ионный ток увеличивается при увеличении напряжения смещения и уменьшении расстояния между сеткой и эмиттером.

Факт возникновения эффекта ЭВ при использовании источника ионов, питаемого мощным барьерным разрядом, доказали прямые измерения скорости воздушного потока над сеткой. Скорость воздушного потока V измерялась термоанемомет-

ром АТТ-1004. Экспериментальная зависимость V от U_0 при $d = 17$ мм, измеренная на расстоянии 5 см от сетки, приведена на рис. 5. Как и в случае коронного разряда, скорость ветра пропорциональна напряжению на сетке.

Профиль распределения скорости воздушного потока в поперечном к осям трубки сечении показан на рис. 6. Несмотря на достаточно большое расстояние от сетки, максимальная величина скорости превышает 1 м/с. Расход газового потока на скорости 0,9 м/с составляет $W = S_w V \approx 7,2$ л/с, где $S_w \approx 80$ см² — площадь потока по уровню скорости 0,9 м/с.

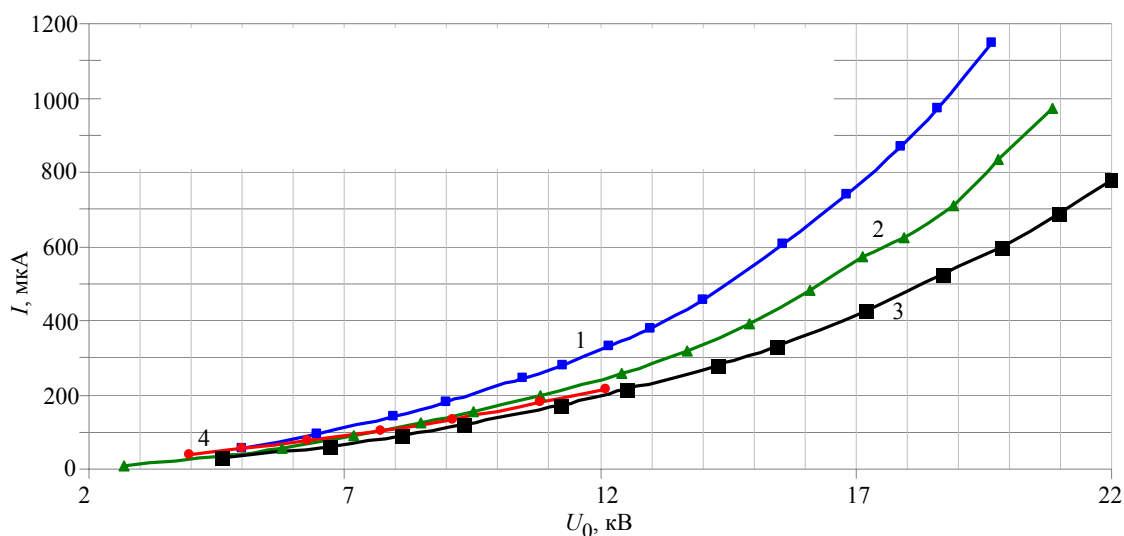


Рис. 4. Экспериментальные вольт-амперные зависимости ионного тока I , текущего от эмиттера к сетке, при изменении напряжения на сетке U_0 и разных значениях d :

1 — $d = 17$ мм; 2 — $d = 20$ мм; 3 — $d = 22$ мм; 4 — $d = 17$ мм
(1—3 — отрицательная полярность сетки, 4 — положительная полярность)

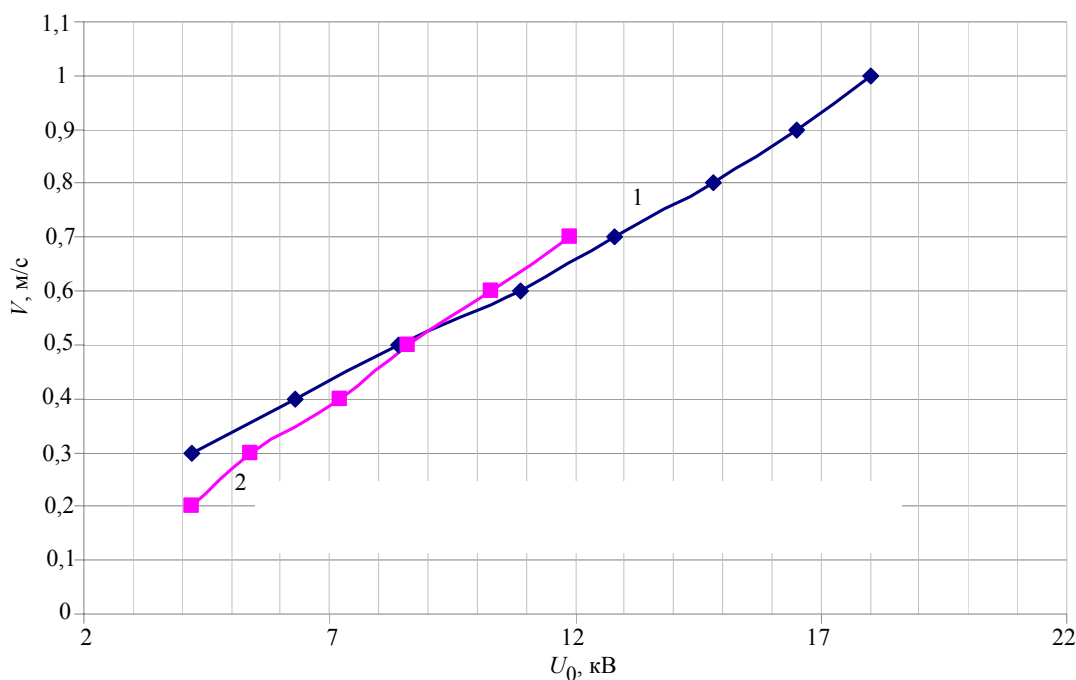


Рис. 5. Экспериментальные зависимости скорости воздушного потока V от напряжения на сетке U_0 при $d = 17$ мм:

1 — отрицательная полярность сетки; 2 — положительная полярность

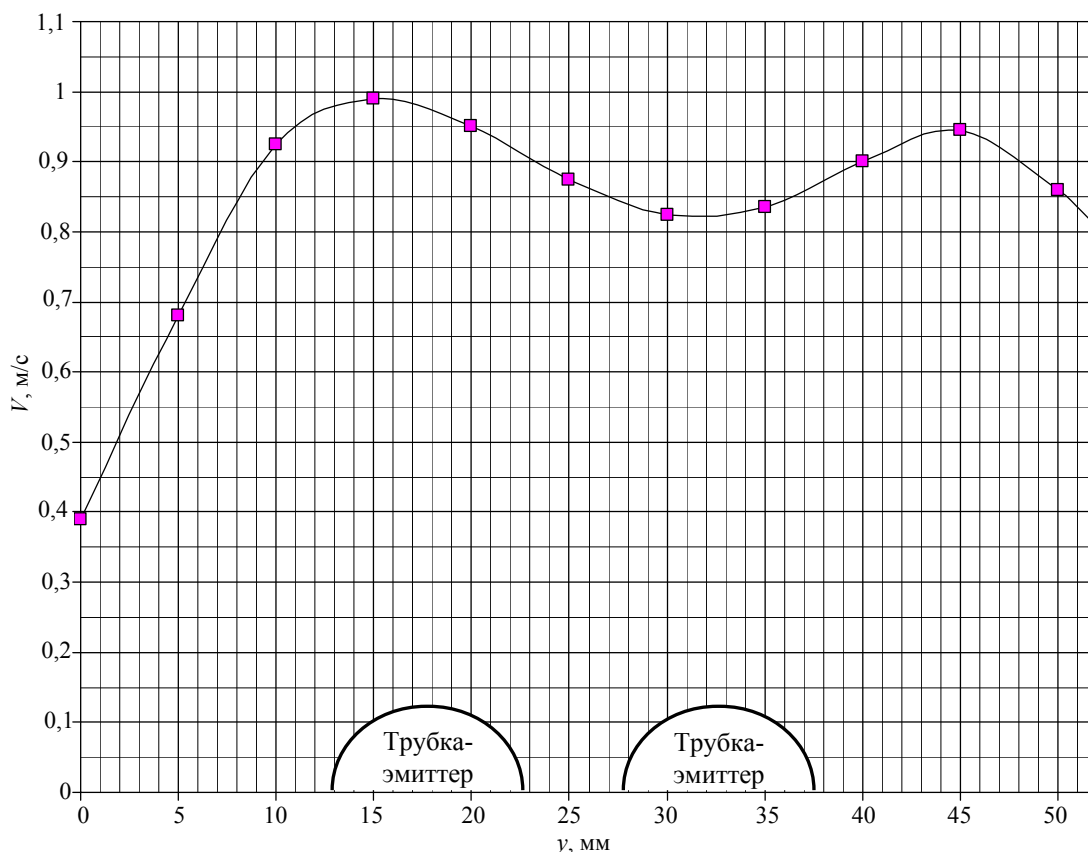


Рис. 6. Профиль распределения скорости воздушного потока V в плоскости поперечного сечения трубок диаметром 17 мм при $U_0 = 17$ кВ

Таким образом, впервые экспериментально получен направленный внешним электрическим полем поток ЭВ, поддерживаемый высокочастотным барьерным разрядом. Достигнута скорость воздушного потока более 1 м/с на площади около 80 см². При этом величина потока составила более 7 л/с, что сравнимо с газовыми потоками, создаваемыми электромеханическими вентиляторами, и значительно превышает величину потока, формируемого с помощью коронного разряда.

Теоретическая модель ионного потока, анализ полученных результатов

Для анализа процесса формирования ЭВ была рассмотрена теоретическая модель, описывающая распределение ионов и тока в межэлектродном промежутке (МП) между эмиттером и сеткой. Анализ проводили в одномерной модели на основе численного решения системы уравнений для распределений напряженности электрического поля $E(x, t)$ и концентрации ионов $n(x, t)$ в МП. Чтобы упростить расчеты, были сделаны следующие предположения:

анод является эмиттером положительных ионов с независимой от времени и напряженности внешнего поля концентрацией на аноде $n(0)$, которая определяется током барьерного разряда;

анод и катод (сетка) представляют две бесконечные плоскости, разделенные межэлектродным промежутком с расстоянием d (ось x — направлена от анода к катоду);

процессы ударной ионизации электронов в промежутке отсутствуют.

В этих условиях система с граничными и начальными условиями записывается в виде:

- уравнения непрерывности для плотности электрического заряда

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(n\mu E)}{\partial x} = 0; \tag{1}$$

- уравнения электростатики [17]

$$\frac{\partial E}{\partial x} = ne / \epsilon_0; \tag{2}$$

- уравнения граничного условия на аноде

$$n(0, t) = \text{const} = n(0); \tag{3}$$

- уравнения для напряжения между электродами

$$\int_0^d E dx = U_0; \tag{4}$$

- уравнения граничного условия на катоде

$$n(x, 0) = 0, \tag{5}$$

где, μ , e — подвижность ионов и заряд электрона, соответственно.

Найдем решение для стационарного режима протекания тока между анодом и катодом. Раскладываем уравнение (1).

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mu E \frac{\partial n}{\partial x} + \mu n \frac{\partial E}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Выразим n , преобразовав уравнение (2)

$$n = \varepsilon_0 / e \frac{\partial E}{\partial x}. \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в (6), а также учитывая, что при стационарном процессе $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$, получим

$$E \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)^2 = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) можно записать в виде, при котором оно легко интегрируется

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial E}{\partial x} E \right)}{\partial x} = 0.$$

Стационарные решения (1)—(5) для $E(x)$, $n(x)$ в случае больших $n(0)$, определяемых выражением

$$\delta = 3\varepsilon_0 E_0 / 4en(0)d \ll 1, \quad (9)$$

записываются в виде

$$E(x) = \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{x}{d} + \delta^2},$$

$$n(x) = \frac{3}{4} \frac{\varepsilon_0 E_0}{ed} \sqrt{\frac{d}{x + \delta^2 d}}.$$

Плотность тока в МП равна $j(x) = en(x)\mu E(x)$,

$$j = \frac{9}{8} \mu \varepsilon_0 \frac{E_0^2}{d} (1 - 3\delta^2). \quad (10)$$

Математическое моделирование производилось с помощью программы Mathcad 2001i Professional.

Расчетные зависимости $E(x)$ и $n(x)$ для значений параметров $U_0 = 22$ кВ, $d = 2,2$ см, $n(0) = 10^{10}$ см⁻³ приведены на рис. 7, а, б, соответственно. Такие значения $n(0)$ легко реализуются в плазме барьерного разряда [16]. При указанных значениях $U_0 = 22$ и d условие (9) выполняется уже при $n(0) = 2 \cdot 10^9$ см⁻³. Из рис. 7 видно, что заполнение межэлектродного промежутка положительными ионами сопровождается сильным искажением электрического поля, причем у анода оно падает, а у катода растет.

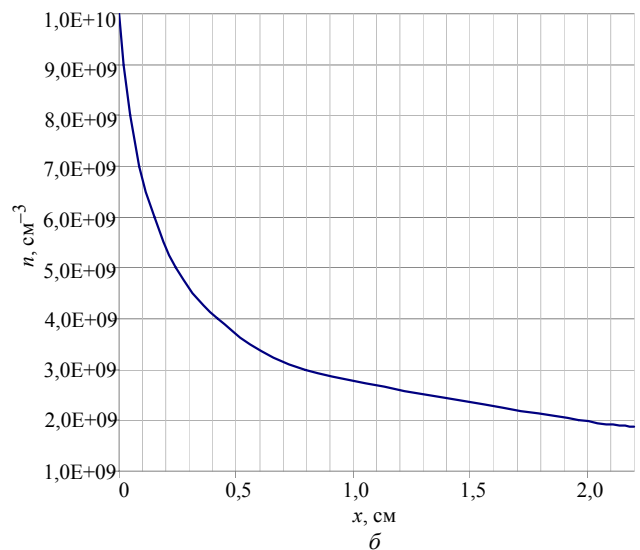
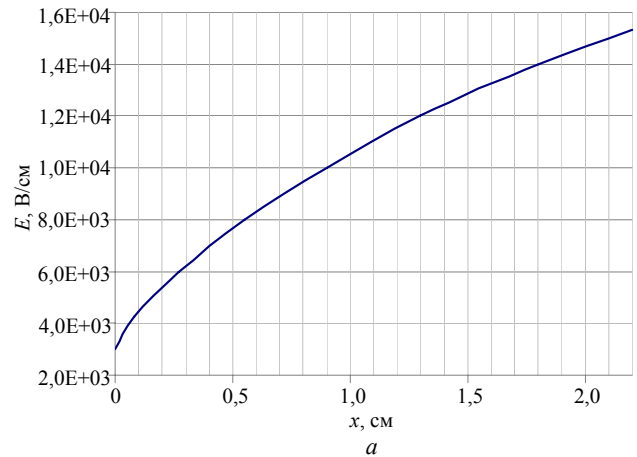


Рис. 7. Распределение:
 а — напряженности поля $E(x)$ в МП;
 б — концентрации ионов $n(x)$ в МП

Это искажение вызвано влиянием самих заряженных частиц, экранирующих поле у анода и усиливающих поле у катода. На катоде напряженность поля $E(d)$ увеличивается в 1,5 раза по сравнению со средним полем $E_0 = U_0/d$ и достигает 15 кВ/см. Скорость дрейфа $V_d = \mu E(d)$ положительных ионов в воздухе ($\mu = 1,37$ см²/(В·с) [18]) составляет около 200 м/с, что намного выше скорости ЭВ.

Для сравнения результатов теоретических расчетов с данными экспериментов из (10) была определена вольт-амперная зависимость ионизованного газового промежутка высотой d и площадью S_i :

$$I = jS_i = \frac{9}{8} \mu \varepsilon_0 \frac{U_0^2}{d^3} S_i. \quad (11)$$

Графики вольт-амперных зависимостей, рассчитанных по формуле (11) для разных значений d и $S_i \approx S_w = 80$ см², приведены на рис. 8. Из сравнения рис. 4 и 8 следует удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными вольт-амперными зависимостями. Экспери-

ментальные значения I несколько превышают расчетные, что обусловлено сделанными при расчете допущениями. Известно, что $V \sim j^{1/2}$ [11—13]. Так как $j \sim U_0^2$, то V должно линейно расти от U_0 , что также согласуется с данными экспериментов (см. рис. 5).

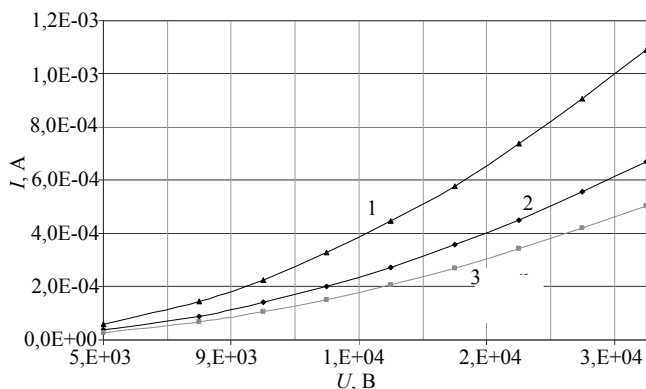


Рис. 8. Расчетные зависимости тока ионов I от напряжения смещения U_0 при $d_1 = 17$ мм (1), $d_2 = 20$ мм (2), $d_3 = 22$ мм (3)

Заключение

Впервые получен поток ЭВ, эмитируемый плазмой высокочастотного барьерного разряда и движущийся в направлении, задаваемом внешним электрическим полем, в частности, в направлении, нормальном к поверхности плазменного эмиттера. В атмосферном воздухе достигнута скорость потока более 1 м/с на площади около 80 см². При этом величина потока составила более 7 л/с, что сравнимо с газовыми потоками, создаваемыми электромеханическими вентиляторами и значительно превышает величину потока, формируемого с помощью коронного разряда.

Создан плазменный эмиттер заряженных частиц, питаемый высокочастотным барьерным разрядом, распределенным по поверхности диэлектрика. Площадь поверхности эмиттера более 60 см², концентрация частиц у поверхности эмиттера — около 10¹⁰ см⁻³.

С помощью метода математического моделирования проанализировано распределение электрического поля и концентрации ионов в ионизованном газовом промежутке между плазменным эмиттером и сеткой, в котором формируется ЭВ, рассчитаны вольт-амперные характеристики этого промежутка. Показано, что ионный поток вызывает сильное искажение электрического поля в межэлектродном промежутке, которое растет в направлении от эмиттера к сетке, достигая на последней максимального установившегося значения 1,5 U_0/d .

Результаты теоретических расчетов удовлетворительно согласуются с данными, полученными в ходе экспериментов.

Рассмотренный подход к формированию ЭВ открывает возможности к созданию мощных устройств для получения управляемых газодинамических потоков, в том числе ионизованных потоков с большим расходом газа.

Данная работа была выполнена при поддержке грантами РФФИ: № 06-08-01212-а, № 08-08-12243-офи.

Литература

1. Капцов Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. — М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1947. С. 210—212, 226.
2. Верецагин И. П. Коронный разряд в аппаратах электрон-ионной технологии. — М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 160.
3. Алтунин В. А.: Тез. докл. На XXVI академических чтениях по космонавтике. Секция 7. — М., 2002.
4. Post M. L., Corke T. C.//AIAA Paper 2003-1024, Proc. of the 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit Reno, NV, January 6—9, 2003.
5. Enloe C. L., Thomas E. McLaughlin, Robert D. Van-Dyken, Kachner K. D., Eric J. Jumper, Thomas C. Corke.// 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 6—9 January, Reno, Nevada, 2003.
6. Reece Roth J., Xin Dai.// 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9—12 January, Reno, Nevada. 2006. P. 1—28.
7. Fumin Yang.//M. S in Electrical Engineering Thesis, University of Washington, 2002. P. 80.
8. David B. Go, Suresh V. Garimella, Timothy S. Fisher, Rajiv K. Mongia. J.//Appl. Phys. 2007. No. 10. P. 053302-053302-8.
9. Kleiner K.//New Scientist. com news service, 15 August 2007.
10. Горкин С. Б., Козлов В. А., Соловьев В. И.//Известия РАН. Сер. Физическая. 1994. Т. 58. № 2. С. 42.
11. Шуайбов А. К., Шимон Л. Л., Шивера И. В.//Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 1. С. 20.
12. Kozlov B. A., Solovyov V. I.//Proceedings of SPIE, XII Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers. — St. Petersburg, Russia. 1998. P. 519—525.
13. Козлов В. А., Соловьев В. И.//Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 7. С. 70—76.
14. Козлов В. А., Соловьев В. И.//Там же. Т. 76. Вып. 7. С. 1—7.
15. Kozlov B. A., Solovyov V. I.//Proceedings of SPIE, XII Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers. — St. Petersburg, Russia. 1998. P. 519.
16. Хомич В. Ю., Ямицков В. А. Формирование электрического ветра с помощью высокочастотного тлеющего разряда": Препринт ИЭЭ РАН. — М.: РИИС ФИАН, 2003.
17. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. — М.: Наука, 1980. С. 415.
18. Кей Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора: Перевод с англ./Под ред. Д. А. Франк-Каменецкого. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. С. 299.

A new method to obtain the directed flows of the charged and neutral particles in the gas, based on "electrical wind" effect

S. V. Nebogatkin, R. R. Khasaya, V. U. Khomich, V. A. Yamschikov
Institute of Electrophysics and Electroenergetic of RAS, Sankt- Peterburg, Russia
E-mail: yamschikov52@mail.ru

A new approach to receiving "electrical wind" in the gas was examined, based on using high frequency barrier discharge. Plasma emitter of ions serving as source of "electrical wind" was created. Electric scheme for "electrical wind" formation developed, electric discharge and gas-dynamic characteristics researched. Velocity of the flow at 80 cm² square were more than 1 m/sec, the value of a stream were more than 7 l/s, under the atmospheric air conditions.

PACS: 41.75.-i

* * *