

## ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе

Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, И.А. Ашихмин

*Коронный разряд тесно связан с сопровождающими его электрогазодинамическими течениями (электрическим ветром). Этим явлениям посвящено огромное количество работ и выпущено несколько монографий. Обычно эти два явления исследуются отдельно, так как считается, что электрический ветер развивается исключительно во внешней зоне коронного разряда. Однако чёткой границы между ионизационным слоем и внешней зоной нет, поэтому взаимосвязь этих процессов изучается в ряде современных работ, где эти два явления рассматриваются совместно. Представлены преимущественно результаты таких работ.*

**Ключевые слова:** коронный разряд, электрогазодинамика, электрический ветер

PACS numbers: 52.70. – m, 52.80. Hc

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>

## Содержание

1. Введение (1331).
  2. Формы коронного разряда (1333).
  3. Система уравнений коронного разряда в дрейфово-диффузионном приближении (1334).
  4. Компьютерные модели отрицательного и положительного коронного разряда (1334).
  5. Экспериментальное исследование кинематической структуры электрического ветра методом лазерной анемометрии (1339).
  6. Упрощённая модель коронного разряда и электрического ветра (1342).
  7. Заключение (1344).
- Список литературы (1344).

## 1. Введение

Коронный разряд (КР) — самостоятельный разряд в газе в неоднородном электрическом поле [1]. Следует также добавить, что коронный разряд наблюдается в случае, когда число длин ионизационных соударений, укладываемых в газовом промежутке, составляет несколько единиц и более. Среди огромного количества работ, посвящённых коронному разряду, следует выделить монографии [2, 3].

Для коронного разряда характерно наличие двух областей с различными свойствами. Ионизационные процессы идут в небольшой по объёму области — чехле КР (в [3] употребляется термин "ионизационный слой"),

где имеет место достаточно высокая напряжённость электрического поля. Подавляющая часть объёма занята так называемой внешней зоной (или зоной дрейфа). Здесь напряжённость поля недостаточно высока для ионизации, поэтому размножения заряженных частиц не происходит, они просто дрейфуют вдоль силовых линий электрического поля. Если полярность коронирующего электрода положительная, то во внешней зоне движутся положительные ионы, если полярность отрицательная — то электроны и отрицательные ионы. В электроотрицательных газах (к которым относится и воздух) активно идёт так называемое прилипание (присоединение электрона к молекуле с образованием отрицательного иона), из-за чего концентрация электронов быстро уменьшается по мере удаления от чехла короны. Установить границу между чехлом короны и внешней зоной можно по свечению. В некоторых работах внешней границей зоны ионизации (чехол короны) считается именно граница области свечения КР.

Описанная картина наблюдается в классических системах типа сфера – плоскость, игла – плоскость, цилиндр – цилиндр и др., где характерный радиус кривизны одного из электродов существенно меньше радиуса кривизны другого. Первый электрод в этом случае принято называть *коронирующим* или *активным электродом*, а второй — *противоэлектродом*. Коронный разряд можно наблюдать и в системах, в которых характерные радиусы кривизны электродов сопоставимы, в этом случае чехлы возникают вокруг обоих электродов, а в зоне дрейфа движутся и положительно, и отрицательно заряженные частицы. Такая корона называется *биполярной* и в данном обзоре не рассматривается.

Для коронного разряда характерна сильная отрицательная обратная связь объёмного заряда во внешней зоне и электрического поля в чехле. Поскольку полярность заряда во внешней зоне совпадает с полярностью коронирующего электрода, собственное поле этого заряда стремится снизить напряжённость в чехле. Сниже-

Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, И.А. Ашихмин.  
Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7-9, 199034 Санкт-Петербург,  
Российская Федерация  
E-mail: y.stishkov@spbu.ru, andreys2004@yandex.ru

Статья поступила 4 августа 2017 г.,  
после доработки 24 апреля 2018 г.

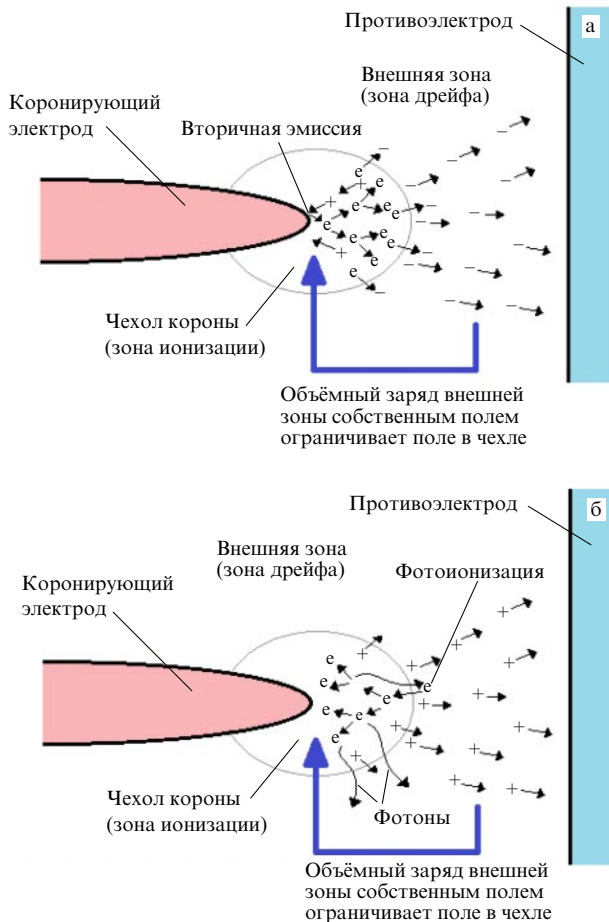


Рис. 1. Структура отрицательного (а) и положительного (б) коронного разряда.

ние напряжённости тормозит ионизацию в чехле и снижает ток из чехла во внешнюю зону. Такая взаимосвязь приводит к тому, что в чехле КР напряжённость электрического поля практически не меняется с ростом напряжения. Это обстоятельство лежит в основе различных приближённых методов расчёта КР, например, метода Дейча – Попкова [3].

Коронные разряды положительной и отрицательной полярности — два существенно различающихся явления. Схематически различия отрицательной и положительной короны показаны на рис. 1. Коронный разряд относится к классу самостоятельных явлений, т.е. для его поддержания не требуется постоянного действия внешнего источника ионизации. Воспроизводство электронов в случае отрицательной полярности обеспечивается вторичной ион-электронной эмиссией: положительный ион, попадая на поверхность катода, с вероятностью  $\gamma$  выбивает электрон, который и становится началом очередной лавины. Безразмерный коэффициент  $\gamma$  называют коэффициентом вторичной эмиссии.

В случае положительного КР вторичные электроны рождаются путём фотоионизации, производимой фотонами, вылетающими из чехла КР. Эти особенности определяют существенные структурные различия чехла КР. В случае отрицательного КР электроны возникают на поверхности электрода и летят от него, производя ионизацию окружающих молекул газа. Поэтому зона максимальной ионизации находится на некотором рас-

стоянии от поверхности электрода. Это расстояние — порядка десятка длин свободного пробега. Далее ионизация спадает по причине спада напряжённости поля.

При положительном КР электроны возникают на некотором расстоянии от поверхности электрода и летят на него, производя ионизацию. Поэтому зона максимальной ионизации примыкает к поверхности электрода.

Обзор литературы по физике газового разряда можно найти в [4].

В [5] рассмотрены переходы между коронным, тлеющим и искровым разрядами при воздействии наносекундными импульсами напряжения. Аналогичные переходы при постоянном напряжении рассматриваются в [6].

Возникновение коронного разряда приводит в движение воздух, поскольку импульс, передаваемый кулоновской силой заряженным частицам, благодаря упругим соударениям эффективно распространяется по нейтральным молекулам. Возникает течение, получившее название "электрического ветра" (ЭВ) [3]. Как правило, это тонкая интенсивная струя, направленная от высоковольтного электрода к заземлённому.

Эффекты, связанные с электрическим ветром, играют существенную роль в промышленных электрофильтрах [3]. Исследуются возможности применения ЭВ для охлаждения твёрдых поверхностей [7–11], создания летательных аппаратов [12, 13]. Имеются экспериментальные свидетельства того, что электрический ветер меняет профиль обтекания различных тел. Так, в работе [14] методом лазерной анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry) было продемонстрировано влияние коронного разряда в системе электродов провод–плоскость на поток, обтекающий пластину. В продолжении этого исследования [15] экспериментально изучалась возможность регулировать поток над плоской пластиной посредством КР. В работах [2, 16–19] проведено компьютерное моделирование электрического влияния КР на обтекание воздухом различных тел. В работе [20] проанализирована роль ЭВ в системе очистки воды от органических загрязнений. Показано, что электрический ветер существенно увеличивает скорость проникновения озона, производимого в чехле коронного разряда, в воду и, как следствие, влияет на скорость очистки воды от загрязнений. В [21] предлагается использовать КР постоянного напряжения для очистки воздуха от толуола; авторам удалось достигнуть эффективности очистки в 93 %.

В [22] представлена многоэлектродная система, в которой течение воздуха, вызванное коронным разрядом, используется для ускоренного высушивания.

Расчёт электрического ветра требует описания как аэродинамики воздуха, так и разрядных процессов. Эти процессы имеют существенно разные пространственный и временной масштабы, в связи с чем численный расчёт задачи об ЭВ требует значительного времени и объёма памяти. Поэтому актуален вопрос об упрощённых моделях электрического ветра.

В [23] моделируется барьерный разряд в плоскосимметричной системе от электрода-лезвия, размещённого на твёрдой диэлектрической подложке. Моделирование выполнено в дрейфово-диффузионном приближении. Расчитано распределение объёмной силы Кулона, расчётная величина сопоставлена с аналитической оценкой. В

работе отсутствует расчёт потоков газа (электрического ветра) и сравнение с экспериментом. В [24] указано, что обработка коронным разрядом существенно меняет свойства поверхности полипропилена и полиэтилена.

В [25] рассматривается применение нескольких типов разряда, в том числе коронного, для стабилизации пламени. Эффективность данного метода зависит от расположения электрода. Отмечается, что расположение электрода и тип разряда влияют на спектр излучения пламени.

Значительное внимание в литературе уделяется плазмохимическим реакциям в коронном разряде и использованию короны как источника активных веществ, применяемых для обработки, очистки, дезинфекции поверхностей. В [26] представлены характеристики генератора озона на основе КР. В [27] рассматриваются реакции, связанные с взаимодействием основных продуктов КР и воды. При помощи коронного разряда изучался процесс удаления фенола из воды [28].

В [29] при помощи масс-спектрометрии анализируется состав отрицательных ионов во внешней зоне отрицательного коронного разряда. Отмечается, что существенную роль в изменении их состава играют реакции с  $O_3$  и  $NO_2$ , образующимися в чехле короны. В результате этих реакций быстро происходит преобразование ионов в  $NO_3^-$  и  $NO_2^-HNO_3$ . Данные ионы указываются в статье как терминальные.

Реактивная сила струи электрического ветра может быть использована как подъёмная сила для создания летательного устройства. Однако из-за низкой эффективности подобные летательные устройства до сих пор требуют подведения электрической энергии извне при помощи проводов [13].

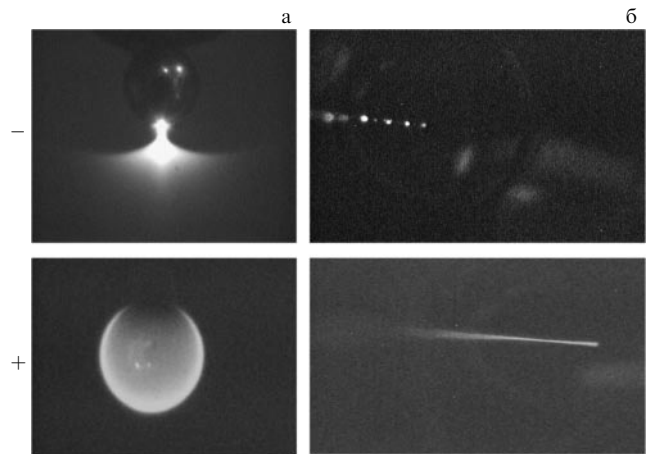
В последние годы множество научных исследований в области физики газового разряда выполнено с использованием программного пакета Comsol Multiphysics, позволяющего численно рассчитывать основные системы уравнений в частных производных, рассматриваемые в данной области физики [30–33].

## 2. Формы коронного разряда

Приведём и проанализируем некоторые современные результаты исследования КР [34].

Обычно в литературе не рассматриваются детально различия в форме коронного разряда при отрицательной и положительной полярности. Однако современные экспериментальные исследования КР при помощи чувствительных камер позволяют выявить эти различия [34]. На рисунке 2 приведены видеокдры чехла КР у поверхности шарового электрода при отрицательной и положительной полярности шарового электрода. На фотографиях отчётливо видны различия в области свечения отрицательной и положительной короны. При отрицательном потенциале коронирующего электрода в большинстве электродных систем наблюдается очаговая форма КР. На рисунке 2 приведены фотографии светлой области (будем называть её чехлом КР) у поверхности проволочного электрода в системе цилиндр-в-цилиндре (б) и системе шар-плоскость (а).

Видно, что на однородной поверхности шарового электрода имеется выраженный очаг КР. Структура свечения отдельного очага приближённо осесимметрична и в сечении напоминает гриб: на полюсе шарового

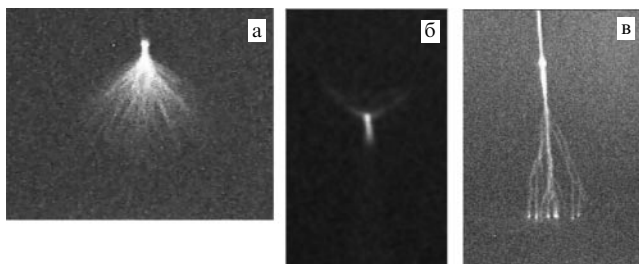


**Рис. 2.** Фотографии чехла КР у поверхности шарового электрода (а) и провода (б) при отрицательной (–) и положительной (+) полярности. (а–) — диаметр шара 0,7 мм, межэлектродное расстояние 20 мм, напряжение 26 кВ; (а+) — диаметр шара 2 мм, межэлектродное расстояние 20 мм, напряжение 24 кВ; (б) — диаметр коронирующего провода 0,09 мм, диаметр заземлённого цилиндра 33 мм.

электрода имеется небольшое активное пятно, из которого прорастает короткая цилиндрическая светящаяся область (ножка) и конически расширяющаяся часть с диффузной внешней границей (шляпка). Аналогичные очаги менее правильной формы наблюдаются на поверхности цилиндрического электрода (рис. 2б). При увеличении диаметра шарового электрода количество очагов увеличивается.

Коронный разряд от положительного электрода имеет совершенно иную структуру. Форма и характер положительного КР существенно зависят от формы и размеров коронирующего электрода, а также от однородности поверхности электрода. Любая неоднородность поверхности приводит к появлению стримерной формы КР. В случае использования в качестве электрода шара с полированной однородной поверхностью чехол положительного КР имеет вид тонкого светящегося слоя вокруг поверхности шарового электрода (рис. 2а). Светящийся сферический слой повторяет форму электрода и имеет толщину порядка 0,1 мм, яркость свечения выше у нижнего полюса шара и спадает к его верхнему полюсу, что коррелирует с распределением напряжённости поля по поверхности шара. Аналогичную форму можно наблюдать на тонком цилиндрическом электроде (рис. 2б). Здесь также наблюдается тонкий непрерывный светящийся слой у поверхности цилиндрического электрода. Очаговая структура полностью отсутствует. Таким образом, при моделировании чехла КР необходимо учитывать полярность коронирующего электрода.

В случае негладкой поверхности или игольчатого электрода при положительной полярности в значительном диапазоне напряжений коронный разряд имеет стримерную форму. При этом от порогового напряжения в некотором диапазоне наблюдаются относительно короткие стримеры (рис. 3а), иногда вырождающиеся в одиночный неветвящийся короткий канал (рис. 3б; можно назвать такую форму "первичной стримерной"). Затем следует диапазон напряжений, в котором наблюдается описанная выше облегаящая корона. При дальнейшем повышении напряжения вновь возникают стри-



**Рис. 3.** Стримерная форма положительного коронного разряда. Радиус закругления иглы 0,1 мм. (а) Первичная стримерная форма, электрод-игла. 10 кВ, межэлектродное расстояние 10 мм. (б) Вырожденная первичная стримерная форма, электрод-игла, увеличенный масштаб — фото острия иглы. 9 кВ, межэлектродное расстояние 10 мм. (в) Развита стримерная форма, электрод-игла. 20 кВ, межэлектродное расстояние 20 мм.

меры (рис. 3в); их протяжённость сопоставима или достигает величины межэлектродного промежутка.

### 3. Система уравнений коронного разряда в дрейфово-диффузионном приближении

Рассмотрим систему уравнений, описывающую коронный разряд в воздухе. В дрейфово-диффузионном приближении она включает три уравнения Нернста – Планка для электронов, отрицательных и положительных ионов и уравнение Пуассона [35]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_e \nabla n_e - n_e \mu_e \mathbf{E}] &= \alpha_0 \mu_e E \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right) n_e - v_{\text{att}} n_e, \\ \frac{\partial n_+}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_+ \nabla n_+ + n_+ \mu_+ \mathbf{E}] &= \alpha_0 \mu_e E \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right) n_e, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_- \nabla n_- - n_- \mu_- \mathbf{E}] = +v_{\text{att}} n_e,$$

$$\varepsilon_0 \Delta \varphi = -e(n_+ - n_e - n_-), \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi.$$

Искомые функции — концентрации электронов, отрицательных и положительных ионов  $n_e$ ,  $n_-$ ,  $n_+$ ; электрический потенциал  $\varphi$ . Частоты ионизации и прилипания считаются известными.

Если в качестве единицы потенциала выбрать отношение  $D_e/\mu_e$ , приблизительно равное средней энергии электрона в электронвольтах, безразмерный потенциал  $\Phi = \varphi \mu_e/D_e$ . Характерную единицу длины можно сформировать следующим образом:  $e\mu_e/D_e\varepsilon_0$ . Из неё легко получить характерную единицу концентрации:  $(e\mu_e/D_e\varepsilon_0)^{-3}$ . Характерная единица времени может быть сформирована так:  $(e\mu_e/D_e\varepsilon_0)^2/D_e = (e\mu_e/\varepsilon_0)^2/D_e^3$ . С таким выбором единиц измерения система уравнений может быть представлена в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_e}{\partial T} + \operatorname{div}' [-\nabla' N_e - N_e \Sigma] &= \\ &= \frac{\psi_{\text{ion}}}{\lambda_{\text{ion}}} \exp\left(-\frac{\psi_{\text{ion}}}{\Sigma}\right) N_e - Y_{\text{att}} N_e, \\ \frac{\partial N_+}{\partial T} + \operatorname{div}' [-\delta_+ \nabla' N_+ + N_+ m_+ \Sigma] &= \frac{\psi_{\text{ion}}}{\lambda_{\text{ion}}} \exp\left(-\frac{\psi_{\text{ion}}}{\Sigma}\right) N_e, \\ \frac{\partial N_-}{\partial T} + \operatorname{div}' [-\delta_- \nabla' N_- - N_- m_- \Sigma] &= +Y_{\text{att}} N_e, \\ \Delta' \Phi &= -(N_+ - N_e - N_-), \quad \Sigma = -\nabla' \Phi. \end{aligned}$$

В системе уравнений возникают безразмерные параметры: безразмерные коэффициенты диффузии  $\delta_- = D_-/D_e$ ,  $\delta_+ = D_+/D_e$ ; безразмерные подвижности  $m_- = \mu_-/\mu_e$ ,  $m_+ = \mu_+/\mu_e$ . Также в функции источника возникают: безразмерная длина ионизации  $\lambda_{\text{ion}} = \varepsilon_0 D_e/\alpha_0 e \mu_e$ ; безразмерная энергия ионизации  $\psi_{\text{ion}} = e \mu_e^2 E_0/\varepsilon_0 D_e^2$ ; безразмерная частота прилипания  $Y_{\text{att}} = v_{\text{att}}/D_e^3 (e \mu_e/\varepsilon_0)^2$ , безразмерное напряжение  $U \mu_e/D_e$ . Также имеются безразмерные геометрические параметры. Например, для системы сфера – плоскость — два безразмерных параметра: радиус электрода  $R \varepsilon_0 D_e/e \mu_e$  и межэлектродное расстояние  $h \varepsilon_0 D_e/e \mu_e$ .

### 4. Компьютерные модели отрицательного и положительного коронного разряда

Компьютерному моделированию КР посвящено большое количество работ. Они различаются постановкой задачи и применяемыми средствами. Рассмотрим результаты моделирования отрицательного КР, полученные с применением программного комплекса мирового уровня Comsol Multiphysics. В работе [35] проведён подробный анализ структуры чехла отрицательного КР и впервые объяснены физические причины формирования очаговой формы отрицательного КР. В работе [36] приведены результаты моделирования положительного КР.

Для расчёта коронного разряда положительной полярности необходимо учитывать фотоионизацию. В данной модели используется упрощённое уравнение, подробно рассмотренное в [37]. Уравнение на концентрацию фотонов  $n_{\text{ph}}$  имеет следующий вид:

$$-\Delta n_{\text{ph}} = -\lambda^2 n_{\text{ph}} + \frac{\lambda}{c} q_{\text{ph}}.$$

Здесь  $q_{\text{ph}}$  — источник рождения фотонов в результате возбуждения электронным ударом,  $\lambda$  — коэффициент поглощения ионизирующего излучения (в  $\text{м}^{-1}$ ). Его зависимость от напряжённости поля задана подобной зависимости коэффициента ионизации от напряжённости, поскольку энергия перехода для этих двух процессов близка (ведь ионизирующие фотоны испускаются с самых верхних энергетических уровней молекулы):

$$q_{\text{ph}} = g v_{\text{ion}}(E) n_e. \quad (2)$$

Здесь  $g$  — безразмерный коэффициент эффективности фотоионизации,  $v_{\text{ion}}$  — частота ионизации электронным ударом,  $n_e$  — концентрация электронов,  $E$  — напряжённость поля.

А для электронов добавляется источник, связанный с фотоионизацией:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_e \nabla n_e - n_e \mu_e \mathbf{E}] = \dots + \lambda c n_{\text{ph}}. \quad (3)$$

Таким образом, и для положительной, и для отрицательной полярности решается система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_e \nabla n_e - n_e \mu_e \mathbf{E}] &= \alpha_0 \mu_e E \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right) n_e - \\ &- v_{\text{att}} n_e + \lambda c n_{\text{ph}}, \\ \frac{\partial n_+}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_+ \nabla n_+ + n_+ \mu_+ \mathbf{E}] &= \alpha_0 \mu_e E \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right) n_e + \\ &+ \lambda c n_{\text{ph}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_-}{\partial t} + \operatorname{div} [-D_- \nabla n_- - n_- \mu_- \mathbf{E}] &= +v_{\text{att}} n_e, \\ -\Delta n_{\text{ph}} &= -\lambda^2 n_{\text{ph}} + \frac{\lambda}{c} g \alpha_0 \mu_e E \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right) n_e, \\ \varepsilon_0 \Delta \varphi &= -e(n_+ - n_e - n_-), \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Система (4) дополняется уравнениями гидродинамики. Движение воздуха возникает при передаче импульса от заряженных частиц окружающим нейтральным молекулам в ходе упругих соударений. В результате можно считать, что кулоновская сила, действующая на заряженные частицы, приложена непосредственно к воздуху в целом:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} &= -\nabla P + \eta \Delta \mathbf{v} + e(n_+ - n_e - n_-) \mathbf{E}, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Свойства коронного разряда определяются направлением электрического поля, а следовательно, направлением полёта ионизирующих частиц — электронов.

Так же как и в экспериментах, в компьютерных моделях рассматривается система электродов сфера — плоскость (рис. 4). Граничные условия приведены в табл. 1.

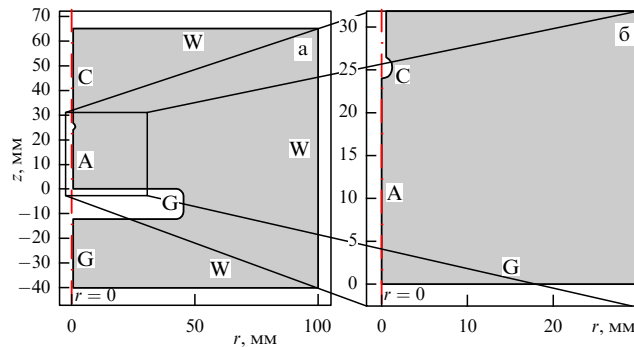


Рис. 4. (а) Геометрия компьютерной модели коронного разряда. (б) Увеличенный масштаб интересующей области.

Таблица 1. Граничные условия

Отрицательная корона				
	C	G	A	W
$\varphi$	$\varphi = -U$	$\varphi = 0$	$\partial\varphi/\partial r = 0$	$\partial\varphi/\partial n = 0$
$n_e$	$j_{e,n} = -\gamma j_{+,n}$	—	$j_{e,r} = 0$	$j_{e,n} = 0$
$n_-$	$j_{-,n} = 0$	—	$j_{-,r} = 0$	$j_{-,n} = 0$
$n_+$	—	$j_{+,n} = 0$	$j_{+,r} = 0$	$j_{+,n} = 0$
$n_{\text{ph}}$	$\partial n_{\text{ph}}/\partial n = 0$			
Положительная корона				
$\varphi$	$\varphi = +U$	$\varphi = 0$	$\partial\varphi/\partial r = 0$	$\partial\varphi/\partial n = 0$
$n_e$	—	$j_{e,n} = 0$	$j_{e,r} = 0$	$j_{e,n} = 0$
$n_-$	—	$j_{-,n} = 0$	$j_{-,r} = 0$	$j_{-,n} = 0$
$n_+$	$j_{+,n} = 0$	—	$j_{+,r} = 0$	$j_{+,n} = 0$
$n_{\text{ph}}$	$\partial n_{\text{ph}}/\partial n = 0$			

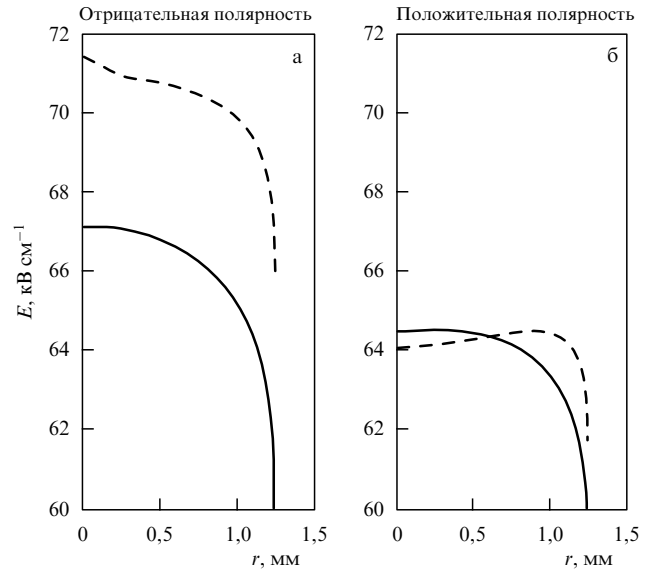


Рис. 5. Распределение напряжённости поля вдоль поверхности шарового электрода. 10 кВ — сплошная линия, 12 кВ — штриховая.

Были использованы следующие коэффициенты:  $\mu_+ = \mu_- = 2,8 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , коэффициент вторичной эмиссии  $\gamma = 3 \times 10^{-4}$  (см. табл. 1).

Далее приведены результаты моделирования для положительного и отрицательного КР и их анализ [34]. На рисунке 5 показаны распределения напряжённости поля вдоль поверхности шарового электрода при двух напряжениях: до порога 10 кВ (сплошная линия) и после зажигания КР 12 кВ (штриховая линия). График на рис. 5а соответствует отрицательному КР, на рис. 5б — положительному. Распределение напряжённости поля в коронном разряде отличается от невозмущённого объёмным зарядом. Причём для отрицательной короны характерно некоторое усиление поля вблизи полюса шара — оси симметрии (эта зона становится областью контакта очага короны с электродом), а для положительной короны — почти равномерное ослабление поля по всей поверхности, причём в центре образуется не максимум, а, напротив, минимум напряжённости (см. рис. 5). Причиной появления локального экстремума напряжённости поля является объёмный заряд, возникающий в чехле отрицательного коронного разряда, он же является причиной ослабления поля в чехле положительного КР.

Соответственно выглядят и области ионизации отрицательной и положительной короны (рис. 6). Следует отметить, что локальные размеры зоны эффективной ионизации отрицательной и положительной короны существенно различны, весьма невелики и не превышают 500 мкм.

На рисунке 6 представлены стационарные распределения интенсивности ионизации в области, близкой к оконечности электрода, для отрицательного (а) и положительного (б) КР. Эти распределения существенно различны. Зона ионизации для отрицательного КР имеет яйцевидную форму, локальный размер её порядка 500 мкм. Следует отметить, что представленная картина формируется в процессе развития КР, начальное распределение силовых линий поля практически однородно. Причиной появления локального экстремума напряжённости поля является объёмный заряд, возникающий в чехле коронного разряда в результате разделения поло-

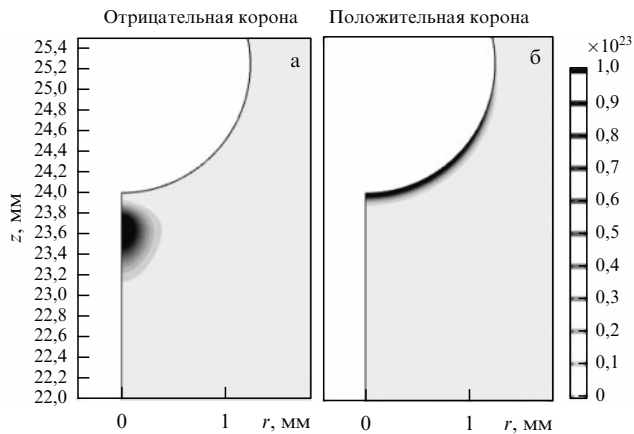


Рис. 6. Распределение интенсивности ионизации (в  $\text{м}^{-3} \text{с}^{-1}$ ). (а) Отрицательная полярность, (б) положительная полярность. Ток 5,4 мкА.

жительных ионов и электронов, а также вторичной ион-электронной эмиссии. Это приводит к повышению концентрации заряженных частиц в области повышенной ион-электронной эмиссии и потока вторичных электронов в малом пятне на полюсе шарового электрода. Следует отметить, что смещение зоны эффективной

ионизации весьма невелико и не превышает 100 мкм. Смещение объясняется необходимостью набора энергии вторичными электронами, возникающими в области повышенной напряжённости на поверхности шарового электрода. Для положительного КР зона ионизации представляет собой тонкий слой, примыкающий к поверхности электрода, причём максимум ионизации примыкает к поверхности электрода. Это связано с тем, что ионизирующие электроны в этом случае летят к поверхности шара.

На рисунке 7 представлены распределения напряжённости поля и концентрации заряженных частиц вблизи электрода. Из рисунка 7 видно, что при отрицательной полярности при переходе в режим самостоятельного разряда в приосевой области формируется очаг чехла коронного разряда с поперечным радиусом около 500 мкм, в котором сосредоточены процессы ионизации. Поэтому положительные ионы, поступающие из области ионизации, сосредоточены в приосевой области у поверхности шара. Концентрация электронов, поступающих из области ионизации, также максимальна в приосевой области на расстоянии около 100 мкм от поверхности катода. От поверхности катода поток электронов нарастает за счёт ударной ионизации, а дальше на расстоянии порядка 100 мкм доминирует область гибели электронов из-за прилипания к молекулам кислорода, и поток, на-

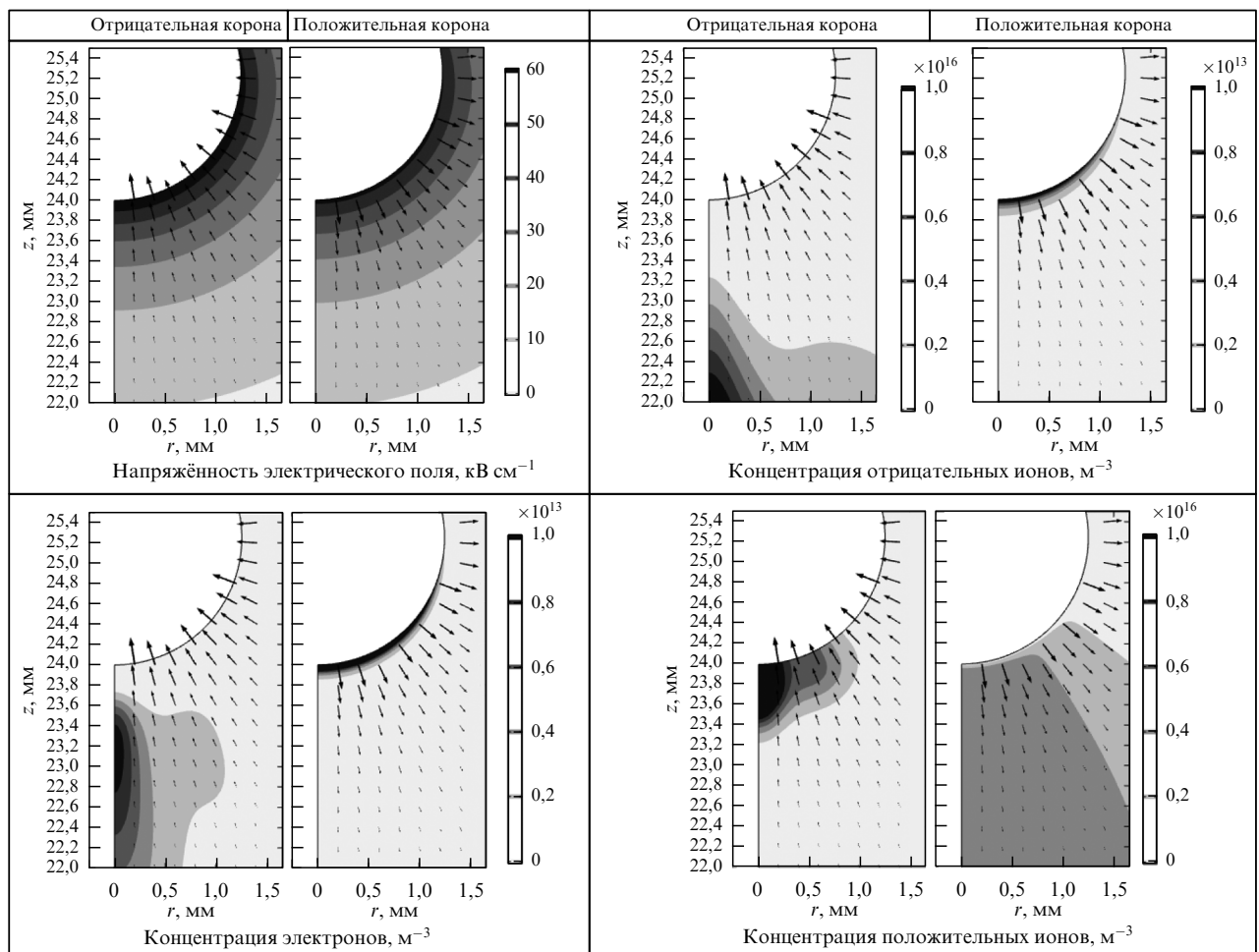


Рис. 7. Сопоставление положительной и отрицательной короны в распределениях напряжённости электрического поля и концентраций. Ток 5,4 мкА.

против, ослабевает. Этим и объясняется наличие максимума концентрации электронов. Вне приосевой области с поперечным размером 20 мкм ионизация практически не происходит.

При положительной полярности область распределения электронов имеет вид не очага, а тонкого слоя, окружающего поверхность электрода.

Именно с распределением заряженных частиц связано наличие узкого максимума напряжённости поля в случае отрицательной полярности. Облако положительных ионов в чехле коронного разряда, поступающее из зоны ионизации и сконцентрированное у оси симметрии, усиливает поле на полюсе катода и частично экранирует воздействие отрицательных ионов внешней зоны. Заряд положительных ионов существенно меньше заряда отрицательных ионов, однако в непосредственной близости от чехла КР их влияние заметно. Разделённая структура заряда в чехле короны вызывает стягивание силовых линий поля и формирует выделенный очаг, не давая чехлу "растекаться" по игле. В результате в режиме развитого КР, в отличие от пороговой стадии несамостоятельного разряда, у оси формируется локальная область повышенной ионизации (см. рис. 5), определяющая поперечные границы очага коронного разряда. Вследствие прилипания электронов к молекулам кислорода из области очага возникает поток отрицательных ионов, который, мигрируя по силовым линиям поля и расходясь, выходит из чехла коронного разряда, формируя своеобразную грибовидную светящуюся шапку. Для положительного КР картина иная. В этом случае отрицательных ионов не возникает, электроны быстро гибнут на электроде, а положительные ионы, рождающиеся в тонком слое у поверхности шарового электрода, слегка понижают поле у его поверхности. В этом случае очагов не возникает.

В модели нет искусственного разделения чехла и внешней зоны, поскольку для всего промежутка решается одна система уравнений (4), (5). Формальной границей чехла можно считать зону, где скорость рождения электронов вследствие ударной ионизации превышает скорость гибели за счёт прилипания к молекулам кислорода, на оси симметрии эта зона не превышает 1000 мкм от катода вне зависимости от напряжения. Следует, однако, отметить, что область свечения значительно шире: как показали предшествующие исследования [38], это связано с тем, что излучение коронного разряда возникает прежде всего как следствие реакций возбуждения молекул газа электронным ударом. Эти реакции обладают меньшими порогами по энергии, чем ударная ионизация, в связи с чем для поддержания активного излучения необходима меньшая напряжённость поля, чем для поддержания ионизации. Вследствие этого область свечения в коронном разряде всегда занимает больший объём, чем область ионизации. Следует отметить сильное искажение силовых линий электрического поля объёмным зарядом, видное на рис. 8: если в невозмущённом объёмным зарядом состоянии силовые линии радиально расходятся от полусферической поверхности оконечности "иглы", то в режиме развитого КР линии поля стягиваются к оси симметрии в области локализации положительного микрооблака, а затем резко расходятся. Поскольку в системе доминирует ток миграции, вызванный электрическим полем (по сравнению с током диффузии), перенос электронов идёт почти вдоль

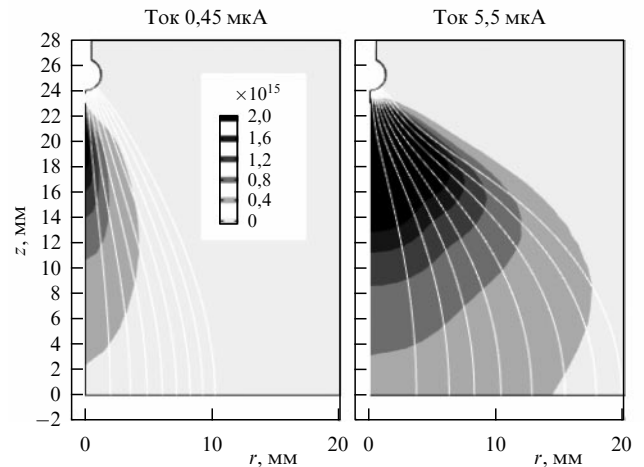


Рис. 8. Концентрация отрицательных ионов и силовые линии электрического поля при разном уровне тока короны. Отрицательная корона.

силовых линий электрического поля, и искажение линий обеспечивает специфическую грибовидную форму очага КР, наблюдаемую в экспериментах (см. рис. 2): тонкую "ножку" у отрицательного игольчатого электрода и широкую диффузную "шляпку".

Вне чехла отрицательного коронного разряда положительные ионы отсутствуют, а концентрация электронов мала, перенос заряда обеспечивается отрицательными ионами. Графики концентрации отрицательных ионов и силовых линий электрического поля во внешней зоне КР приведены на рис. 8. Во внешней зоне также значительно искажение силовых линий электрического поля объёмным зарядом. Поскольку заряд ионов отрицательный, силовые линии огибают его, облако отрицательных ионов как бы расталкивается под действием кулоновской силы. Таким образом, утверждение о том, что зона ионизации однородно распределена по поверхности инжектирующего электрода, для отрицательного КР неверно. Зона ионизации сосредоточена на кончике инжектирующего электрода, и хотя размер зоны ионизации остаётся неизменным, распределения электрического поля во внешней зоне существенно изменяются с ростом напряжения — расхождение силовых линий усиливается, и размер области, в которую приходят ионы на противозлектроде, увеличивается.

Итак, модели при положительной и отрицательной полярности существенно различаются, причём результаты моделирования соответствуют результатам экспериментов. При положительной полярности электроны тонким слоем распределены по поверхности электрода-сферы, а при отрицательной — формируют облако, вытянутое вдоль оси симметрии. Таким образом, в модели воспроизводится очаговая форма отрицательной короны и облегающая форма положительной короны.

Форма распределения электронов определяет и распределение ионов во внешней зоне: отрицательные ионы в отрицательной короне принимают форму, которую можно сравнить с грибом, — с тонкой ножкой, расширяющейся по мере удаления от сферы. Напротив, при положительной короне положительные ионы расходятся от сферы широким потоком от всей поверхности шаро-



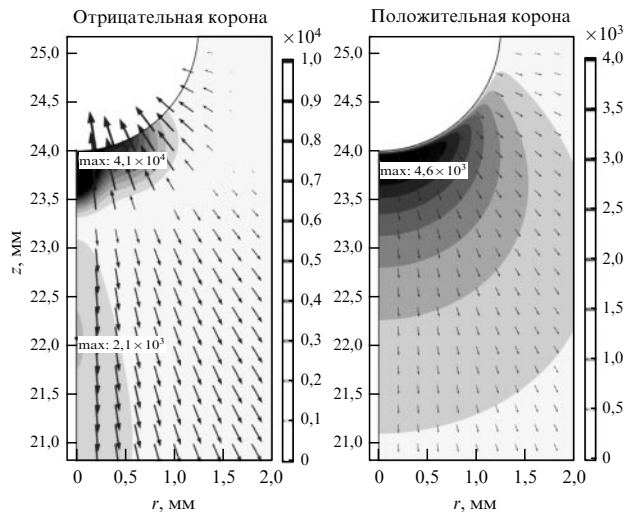


Рис. 9. Распределение объёмной кулоновской силы (в Кл м<sup>-3</sup>). Ток 5,4 мкА.

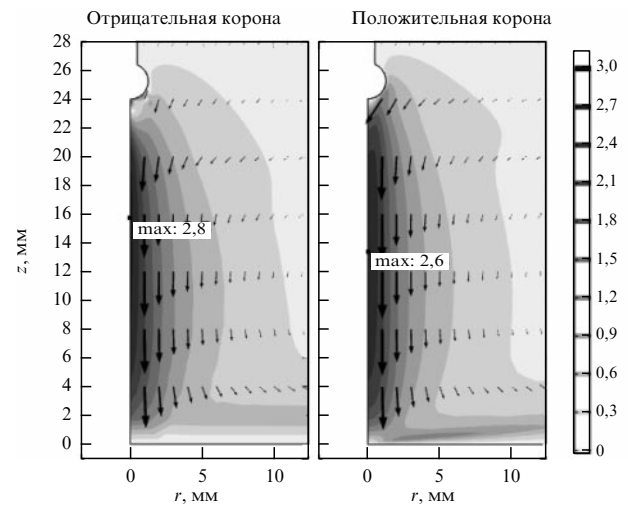


Рис. 11. Распределение скоростей воздуха (в м с<sup>-1</sup>). Ток 5,4 мкА.

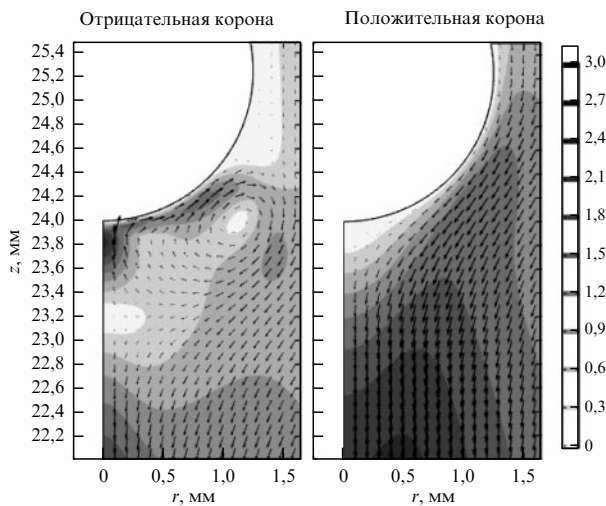


Рис. 10. Распределение скорости воздуха (в м с<sup>-1</sup>) вблизи электрода. Ток 5,4 мкА.

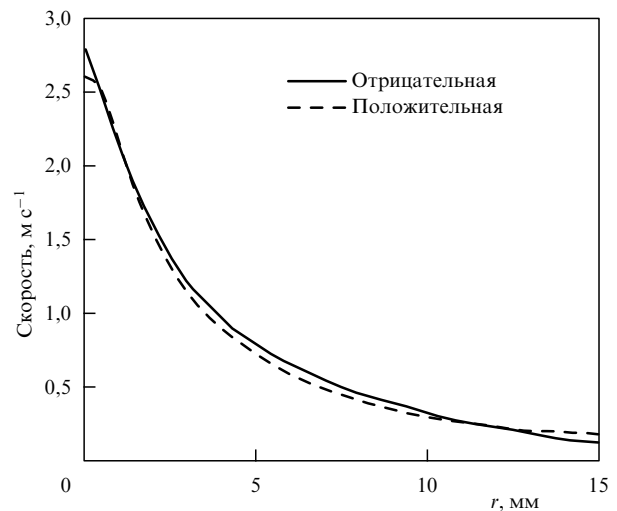


Рис. 12. Распределение аксиальной компоненты скорости на линии, проведённой посередине межэлектродного промежутка. Ток 5,4 мкА.

вого электрода. Также следует отметить, что в случае отрицательной короны электроны относительно далеко отходят от поверхности шара, в результате облако отрицательных ионов отделено от шара зазором примерно в 1 мм. В положительной короне, напротив, зазор предельно мал — менее 0,1 мм.

Форма очага определяет форму распределения кулоновской силы, движущей воздух (рис. 9). В случае отрицательной короны имеется небольшая компактная область ионизации с мощной силой, направленной из области ионизации к шаровому электроду, и более широкая область с силой, направленной от области ионизации к противоэлектроду. В случае положительной короны кулоновская сила направлена от шарового электрода и распределена вдоль его поверхности.

Соответственно имеются и различия в структуре возникающего электрического ветра. При отрицательной полярности разнонаправленный характер сил приводит к возникновению микроскопического вихря вблизи поверхности шарового электрода, при положительной полярности его нет (рис. 10). Микровихрь приводит к

нестабильности очага КР относительно поверхности электрода. В экспериментах наблюдаются небольшие флуктуации чехла КР относительно оси симметрии.

На большем масштабе течения при разных полярностях весьма схожи (рис. 11). Следует отметить, что хотя направления поля противоположны, течения определяются движением ионов. Поэтому основная струя течения идёт в обоих случаях от сферы к плоскости. При положительной полярности струя несколько шире — это связано с большим радиальным размером области кулоновской силы при положительной полярности по сравнению с узким очагом при отрицательной. Однако в системах с другой геометрией, для которых размеры очага больше радиуса закругления электрода, возможна иная ситуация: в частности, в системе игла – плоскость струя электрического ветра положительной короны существенно уже отрицательной.

На рисунке 12 приведены профили скорости ЭВ для положительной и отрицательной короны в середине межэлектродного промежутка. Видно, что они практически совпадают.



## 5. Экспериментальное исследование кинематической структуры электрического ветра методом лазерной анемометрии

Известно, что горение коронного разряда в воздухе сопровождается не только ионизационными процессами, но также и движением нейтральной среды в межэлектродном промежутке, которое называется электрическим ветром. Данное явление находит применение в различных технологиях и устройствах, например, электрических фильтрах, электрогидродинамических (ЭГД) актуаторах, ионных двигателях, устройствах интенсификации теплообмена и др. [3].

Экспериментальное исследование кинематики электрического ветра представляет собой достаточно сложную задачу [39, 40], поскольку горение коронного разряда приводит к образованию пространственного заряда и возможно только в области высоких электрических полей. Поэтому до недавнего времени удавалось измерять скорости ЭВ только вне чехла КР. В настоящем разделе приводятся результаты измерения поля скоростей в системе электродов игла – тор при разных полярностях подаваемого напряжения на современной установке La Vision FlowMaster.

Исследование кинематики электрического ветра проводилось в системе электродов игла – тор. Эта система удобна тем, что струя ЭВ свободно проходит сквозь отверстие в противозлектроде, не создавая возвратных вихрей. Для исследования поля скоростей использовался метод лазерной анемометрии по изображениям частиц (англ. Particle Image Velocimetry, PIV), который позволяет получать поле скоростей в полностью автоматическом режиме. Измерения поля скоростей производились на базе установки FlowMaster от компании La Vision ресурсного центра "Геомодель" Санкт-Петербургского государственного университета. В основе метода лежит статистический анализ наиболее вероятного смещения ансамбля частиц. Для регистрации изображений PIV-методом используется следующая схема: луч лазера с помощью цилиндрической линзы преобразуется в подобие оптического ножа, который высвечивает определённую плоскость в кювете. Ширина получаемого оптического ножа оценивалась примерно в 0,5–1,0 мм. Полученное изображение фиксировалось с помощью телекамеры ImagergoX с разрешающей способностью по интенсивности 14 бит и размером матрицы 1200 × 1600 и потом обрабатывалось в программе DaVis. Для работы PIV-метода необходимо получить два последовательных кадра через некоторый фиксированный промежуток времени. Время между вспышками лазера выбиралось таким образом, чтобы смещение визуализирующих частиц было больше одного пикселя и меньше четверти размера поискового окна.

Одним из важных моментов при исследовании электрического ветра с помощью PIV-метода является вопрос о выборе частиц для визуализации. В работе французских учёных [41] приводится сравнение различных веществ для визуализации потоков в воздухе, таких как сигаретный дым, масло, микросферы диоксида кремния SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>. Авторами этого исследования было показано, что визуализацию с помощью масла и микросфер SiO<sub>2</sub> нельзя использовать в исследовании электрического ветра, поскольку эти вещества практически на порядок изменяют величину протекающего тока в системе.

Также авторами [41] были предложены безразмерные критерии, такие как число Стокса, число Архимеда и соотношение подвижностей. Было показано, что частицы размером менее 1 мкм удовлетворяют этим соотношениям и, следовательно, пригодны для визуализации. В экспериментах для визуализации применялся диоктиловый эфир себациновой кислоты (DEHS). Данное вещество также было использовано в работе [42]. DEHS распылялся с помощью генератора аэрозоля, поставляемого в комплекте с установкой. Заявленный производителем средний диаметр отдельных частиц составлял 500 нм, скорость генерации была равной примерно 100 млн единиц в секунду.

В экспериментах на систему электродов подаётся линейно возрастающее напряжение, в результате чего после прохождения порогового значения загорается корона. Загорание короны является обязательным условием возникновения электрического ветра, а после появления ЭВ вся среда приходит в движение, включая визуализирующие частицы.

Рассмотрим поля скоростей электрического ветра в воздухе в системе электродов игла – тор, получаемые при разных полярностях при линейном росте напряжения от порога зажигания до 15 кВ.

Наиболее богатой в плане разнообразия наблюдаемых явлений является отрицательная полярность. Известно, что на пороге зажигания короны при отрицательной полярности корона носит мигающий характер, а ток через систему — импульсный характер (так называемые импульсы Тритчела, частота которых при увеличении напряжения быстро увеличивается), и при высоких напряжениях корона начинает гореть стабильно. В экспериментах до порога зажигания короны в системе зарегистрировано протекание тока, величина которого на несколько порядков меньше значения токов, протекающих при горении короны.

Как уже отмечалось, при дальнейшем увеличении напряжения в системе на пороге зажигания короны регистрируются импульсы тока (импульсы Тритчела), причём их частота возрастает с увеличением напряжения. Природа импульсов Тритчела связана с сильным влиянием объёмного заряда на процессы вторичной ион-электронной эмиссии с поверхности игольчатого электрода. При напряжении, близком к пороговому, частота следования импульсов менее 1 Гц, при этом можно зафиксировать с помощью видеокамеры следующую картину: в момент зажигания короны от игольчатого электрода возникает и движется в объём область воздуха, в которой визуализирующие частички практически отсутствуют. На рисунке 13 приведён характерный вид распределения визуализирующих частиц около игольчатого электрода.

Светлые точки соответствуют отдельным визуализирующим частицам. Сверху мы видим яркую область (координаты по оси  $x$  — 6 мм, по оси  $y$  — 0), которая соответствует отражению от иголки. Под иголкой имеется грибовидная область без визуализирующих частиц. Эта область появляется в области чехла отрицательной короны, имеющей также грибовидную форму, одновременно с зажиганием чехла, т.е. одновременно с одиночным импульсом тока, и, по-видимому, содержит порцию повышенной концентрации объёмного заряда, так как она движется под действием электрического поля сверху вниз со скоростью порядка 30 см с<sup>-1</sup> (см. рис. 13).

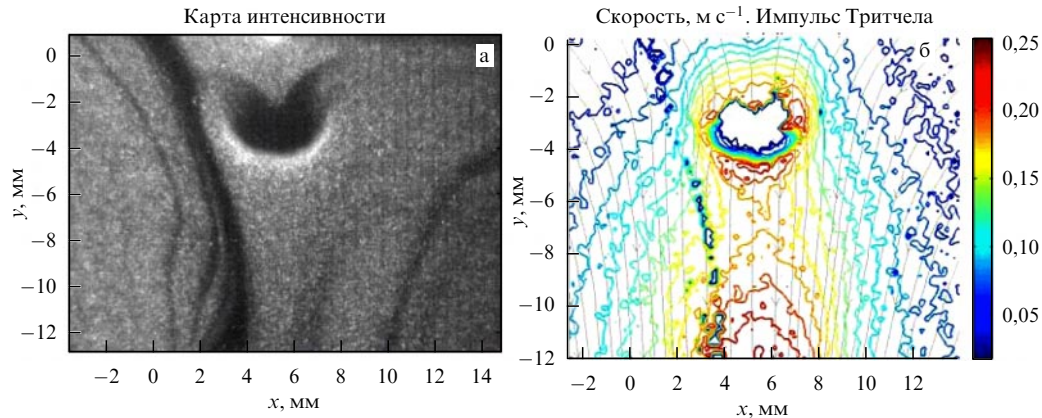


Рис. 13. Распределение визуализирующих частиц (а) и распределение скоростей (б) в фазе импульсов Тритчела отрицательного коронного разряда.

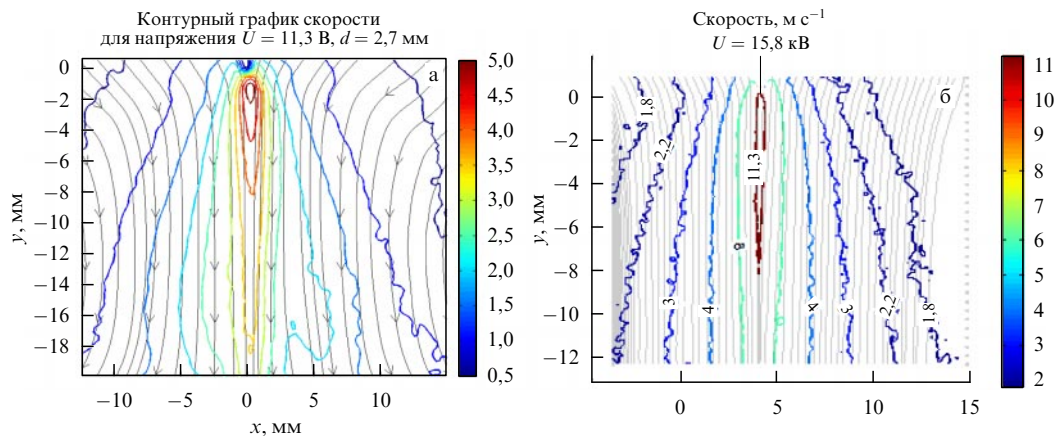


Рис. 14. Линии тока ЭВ и контуры линий уровня скорости ЭВ; (а) отрицательная, (б) положительная полярность иглы.

При увеличении напряжения частота импульсов тока увеличивается и одновременно линейно с напряжением возрастает количество таких областей в поле зрения камеры. Области расположены вдоль оси течения на равных промежутках. На осциллограммах тока момент появления такой области соответствует импульсу тока. Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученное изображение соответствует потоку электрического ветра, образованному от отдельного импульса Тритчела. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к тому, что частота импульсов возрастает.

На рисунке 14 приведено распределение линий уровня скорости при отрицательной игле и напряжении 11,3 кВ (данные обработаны с использованием математического пакета MatLab), а также линии тока электрического ветра. Видно, что течение имеет очень короткую ( $\sim 1$  мм) зону ускорения, лежащую под иглой, далее скорость плавно уменьшается в продольном направлении, а линии тока взаимно параллельны. В зоне ускорения на воздух действует кулоновская сила, а далее струйка торозится за счёт сил трения.

В отличие от отрицательной полярности, при положительной чехол коронного разряда имеет облегачущую форму и до возникновения стримеров она не меняется. Поэтому здесь не возникает такого разнообразия явлений, а импульсы Тритчела отсутствуют и ЭВ начиная с порога зажигания носит стационарный характер. Здесь

следует отметить, что ширина струйки электрического ветра при положительной короне меньше, чем при отрицательной (см. рис. 14). Кроме того, во внешнюю область попадают не отрицательные ионы, образованные прилипшими электронами, а положительные ионы, поступающие непосредственно из зоны ионизации. Поэтому плотность положительных ионов выше, а размер области высокой плотности положительных ионов компактнее. Это приводит к тому, что радиус струи электрического ветра от положительного электрода существенно уже и примерно соответствует радиусу кончика игольчатого электрода.

Отметим также, что максимальное значение скорости при положительной полярности почти в два раза больше, чем при отрицательной. Рассмотрим приведённые профили скоростей на расстоянии 5 мм от кончика иглы для разных полярностей и разных напряжений (рис. 15). Из этих графиков мы можем определить, что радиус струи ЭВ для отрицательной полярности равен примерно 4 мм, тогда как радиус при положительной полярности составляет  $\sim 2$  мм. Таким образом, мы подтвердили вывод, сделанный выше из качественного рассмотрения контурных графиков.

Сравним осевые распределения скорости для положительной и отрицательной полярностей (см. рис. 15). Видно, что зоны ускорения для обеих полярностей примерно совпадают и размер зоны составляет менее

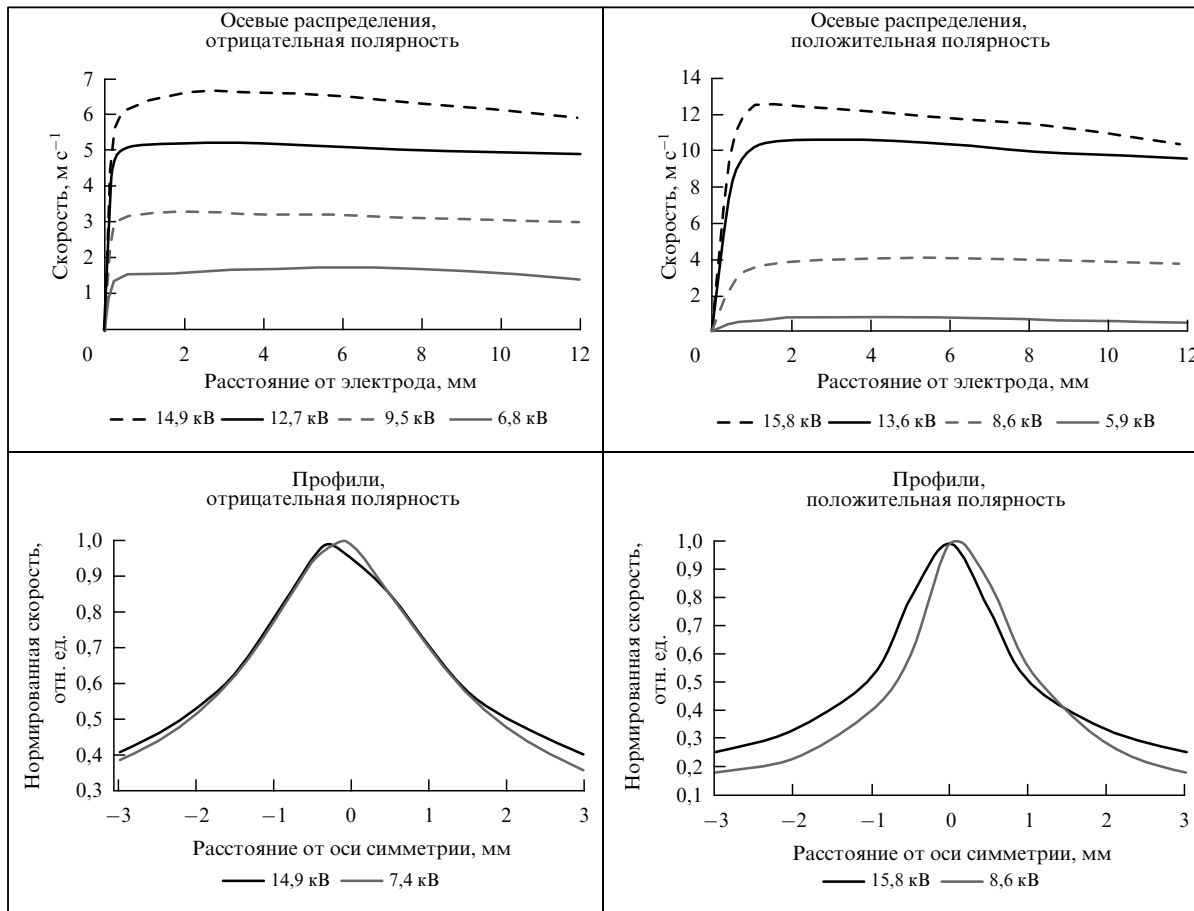


Рис. 15. Осевые распределения и профили скорости воздуха при отрицательной и положительной полярности иглы.

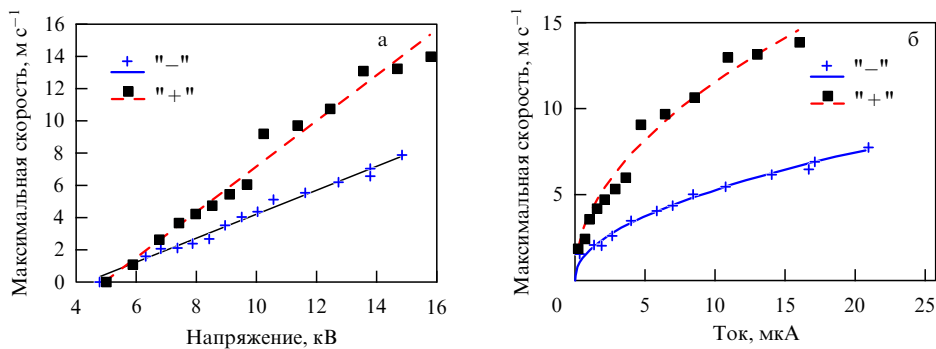


Рис. 16. Зависимость максимальной скорости от напряжения (а) и тока (б). Штриховая кривая — положительная полярность, сплошная — отрицательная. Символами обозначены экспериментальные данные.

1–2 мм, что соответствует характерному размеру чехла коронного разряда. После зоны ускорения имеется слабый спад скорости вдоль оси для отрицательной полярности. При положительной же наблюдается более существенное снижение скорости при больших напряжениях.

Из более ранних исследований известно, что после порога зажигания КР имеется пропорциональная зависимость между средней скоростью (расходом в центральной струйке) ЭВ и напряжением [3]. Это подтверждается нашими исследованиями (рис. 16).

Из рисунка 16 следует, что зависимость максимальной скорости (а значит, и средней, так как профили скоростей ЭВ подобны для всех напряжений (см. рис. 15)) от напряжения линейна. Таким образом, полученные данные удовлетворяют известным эмпирическим зависимостям.

В результате проведённых современных исследований электрического ветра методом лазерной анемометрии были получены и подтверждены опубликованные ранее результаты по структуре ЭВ [3], а также получены некоторые новые результаты:

1. В области пороговых напряжений в импульсном режиме отрицательной короны зарегистрирован импульсный ЭВ, состоящий из отдельных заряженных грибовидных областей, перемещающихся по межэлектродному промежутку со скоростями порядка  $30 \text{ см с}^{-1}$ .

2. В установившемся режиме поток электрического ветра имеет характерный гауссов профиль скоростей, форма профиля не зависит от напряжения, а продольное распределение скоростей имеет зонную структуру: короткую зону ускорения и протяжённую зону квазиоднородного течения.

3. Радиус струи ЭВ определяется структурой чехла коронного разряда: при отрицательной полярности игольчатого электрода радиус струи вдвое превышает радиус струи при положительной полярности.

4. Зависимость средней скорости (расхода) ЭВ от напряжения линейна, зависимость от тока носит корневой характер.

## 6. Упрощённая модель коронного разряда и электрического ветра

Компьютерное моделирование электрического ветра на основе полной системы уравнений с рассмотрением ионизационных процессов в чехле коронного разряда возможно (см. рис. 6, 7), однако крайне ресурсоёмко. Поэтому разрабатываются упрощённые модели, основанные главным образом на униполярном приближении, — в объёме рассматривается только внешняя зона разряда, в которой присутствуют заряженные частицы одного знака (соответствующего полярности активного электрода), и нет ионизации [43]. Чехол коронного разряда в таких моделях описывается посредством граничного условия. В основном применяются два подхода (в обзорах [3, 43] приведён представительный список работ по моделированию электрического ветра с указанием использованного типа граничных условий).

Первый подход — один из наиболее распространённых — состоит в том, чтобы использовать экспериментальную вольт-амперную характеристику (ВАХ). Плотность потока отрицательных ионов  $j_-$  задаётся как функция напряжённости поля  $E$ :

$$j_-(E) = C(E - E_0).$$

Константы  $C$  и  $E_0$  подбирают так, чтобы модельная ВАХ совпадала с экспериментальной. Недостатком данного подхода является, очевидно, то, что при любой модификации геометрии ВАХ изменится, и придётся снова измерять её в эксперименте и подбирать значения  $C$  и  $E_0$ .

Второй подход заключается в использовании условия постоянства напряжённости на поверхности активного электрода:

$$E = \text{const}.$$

В качестве константы используют значения, близкие к критической напряжённости в воздухе ( $25 \text{ кВ см}^{-1}$ ), для цилиндрического электрода используют формулу Пика [44]. Это условие в общем случае неприменимо для всего высоковольтного электрода, поэтому необходимо заведомо выделить на нём коронирующую область, что представляет проблему.

Также применяются аналитические оценки для конкретных форм электродов, особенно для цилиндриче-

ского электрода [45]. Существуют и принципиально другие подходы. Например, в [46] задаётся плотность объёмного заряда на коронирующей поверхности электрода. Однако в экспериментах эта величина не измерима.

Таким образом, есть несколько широко употребляемых методов, однако у каждого из них имеются существенные недостатки. В [47–49] предлагается оригинальная форма граничного условия — соотношение для скорости роста плотности потока заряженных частиц из чехла коронного разряда:

$$\frac{\partial j_e(b, t)}{\partial t} = j_e(b, t) \frac{\gamma \exp(M) - 1}{\tau}, \quad (6.1)$$

$$\tau = \int_a^b \frac{dy'}{\mu_+ E(y')}, \quad (6.2) \quad (6)$$

$$M = \int_a^b \alpha(E(y')) dy'. \quad (6.3)$$

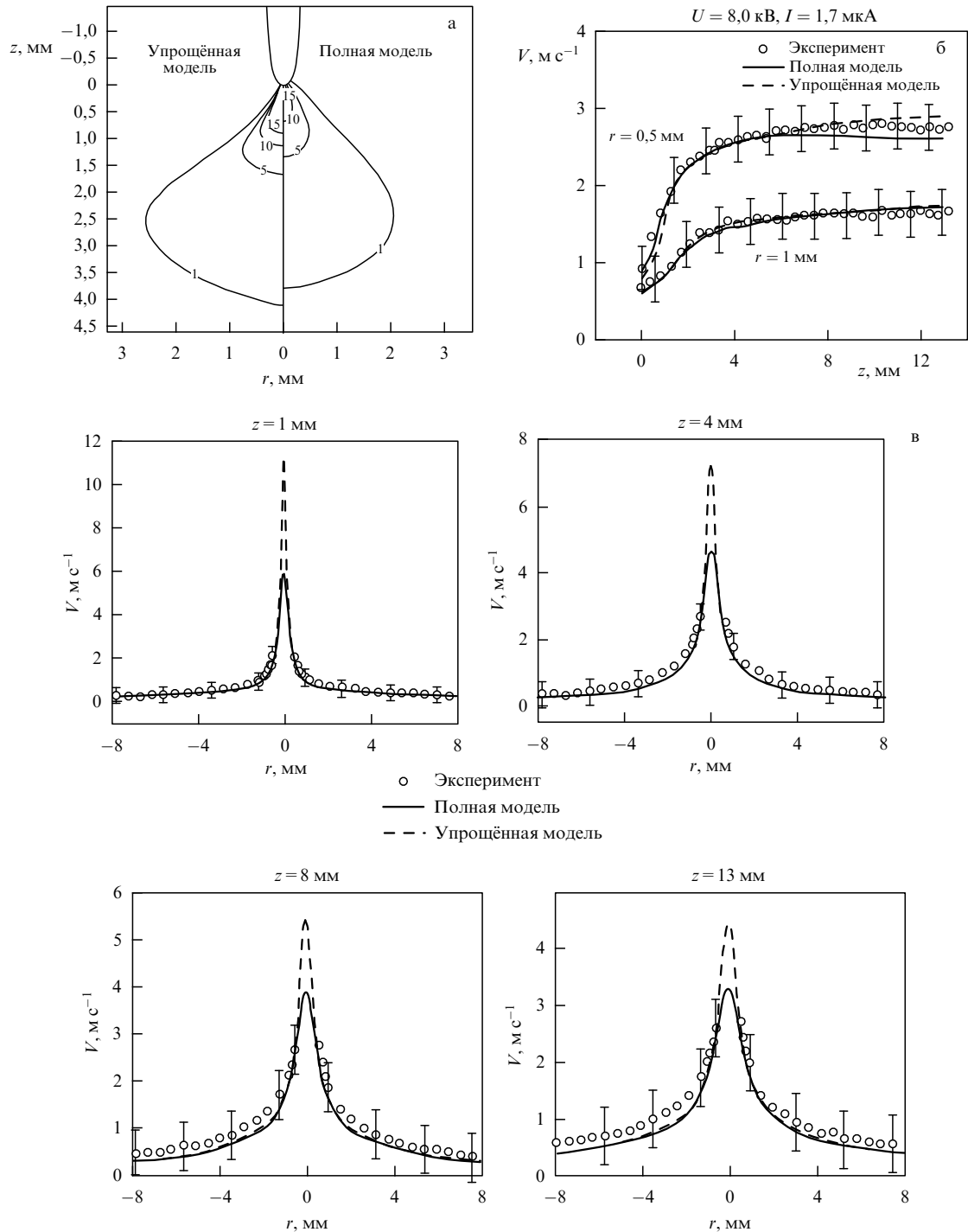
Здесь интегралы (6.2), (6.3) берутся вдоль силовой линии  $ab$ ,  $y'$  — координата вдоль этой силовой линии. Имеется множество силовых линий,  $b$  — переменная, дающая точку на активном электроде (ясно, что каждой такой точке соответствует своя силовая линия).  $M$  — число ионизационных столкновений на силовой линии электрического поля, приходящей в точку  $b$ ; таким образом,  $M$ , как и плотность входящего в воздух тока  $j_e$ , можно рассматривать как функцию, определённую на поверхности активного электрода. Соотношение (6.1) можно трактовать как расширение известного условия поддержания самостоятельного разряда [1],  $\gamma \exp(M) - 1 = 0$ , на нестационарный случай. Приняв некоторые допущения, можно вывести его из системы дрейфово-диффузионного приближения (1) [47].

В рассматриваемой модели чехол КР, структура которого выявляется в дрейфово-диффузионном приближении (см. рис. 6), сводится к уравнению (6.1), решаемому на поверхности активного электрода. Такая модель может быть использована для расчёта распределений концентраций частиц, полей скоростей во внешней зоне КР, а также для расчёта некоторых интегральных характеристик. Структура очага в данной модели не рассматривается.

Следует отметить, что вопрос о том, насколько корректно модель работает в случае многоочаговой формы отрицательного коронного разряда (рис. 2б), остаётся открытым. Поскольку структура и свойства очага в упрощённой модели описываются приближённо, нет оснований предполагать, что для системы с многоочаговой структурой возникнет соответствующее реальности расположение очагов.

Рассмотрим положительный КР в системе электродов игла–плоскость. Для данной системы при помощи PIV-метода получены поля скоростей при разных напряжениях, а также проведены расчёты в рассматриваемой униполярной модели с граничным условием (6.1)–(6.3) и в дрейфово-диффузионном приближении (4), (5). Сопоставление результатов моделирования и эксперимента приведено на рис. 17.

На рисунке 17а сравниваются распределения объёмного электрического заряда в униполярной (упрощённой) и дрейфово-диффузионной (полной) модели. Вблизи оконечности иглы (на расстоянии примерно до 1 мм) упрощённая модель демонстрирует существенно большие значения плотности объёмного заряда по сравнению



**Рис. 17.** Сопоставление униполярной (упрощённой) и дрейфово-диффузионной (полной) модели коронного разряда с экспериментом. Напряжение  $U = 8,0$  кВ, ток  $I = 1,7$  мкА. (а) Контурные графики суммарного объёмного заряда ( $\text{мКл м}^{-3}$ ) для двух моделей. (б) Распределение скорости вдоль оси  $z$ . (в) Радиальные распределения скорости воздуха на разном расстоянии  $z$  от иглы.

с полной, однако уже на расстоянии в несколько миллиметров различия нивелируются.

Описанное различие в объёмном заряде у кончика иглы приводит к разнице в скоростях в центре, достигающей 1,5 раз (рис. 17в). Однако на том же графике видно, что различие наблюдается в очень узкой области, порядка 0,1 мм от оси симметрии. В остальной области наблюдается хорошее соответствие по профилям скорости. Отсюда следует, что интегральные характеристики (такие как расход воздуха, сила давления на противо-

электрод) в униполярной модели будут мало отличаться от таковых в дрейфово-диффузионной. Экспериментально получить значения скорости в самом центре струи пока не удалось.

Измеренные профили скорости в струе согласуются с расчётом (рис. 17в). По мере удаления от кончика иглы струя постепенно расширяется.

Продольное распределение скорости, которое строилось на расстоянии 0,5 и 1,0 мм от оси симметрии модели, весьма схоже в моделировании и эксперименте

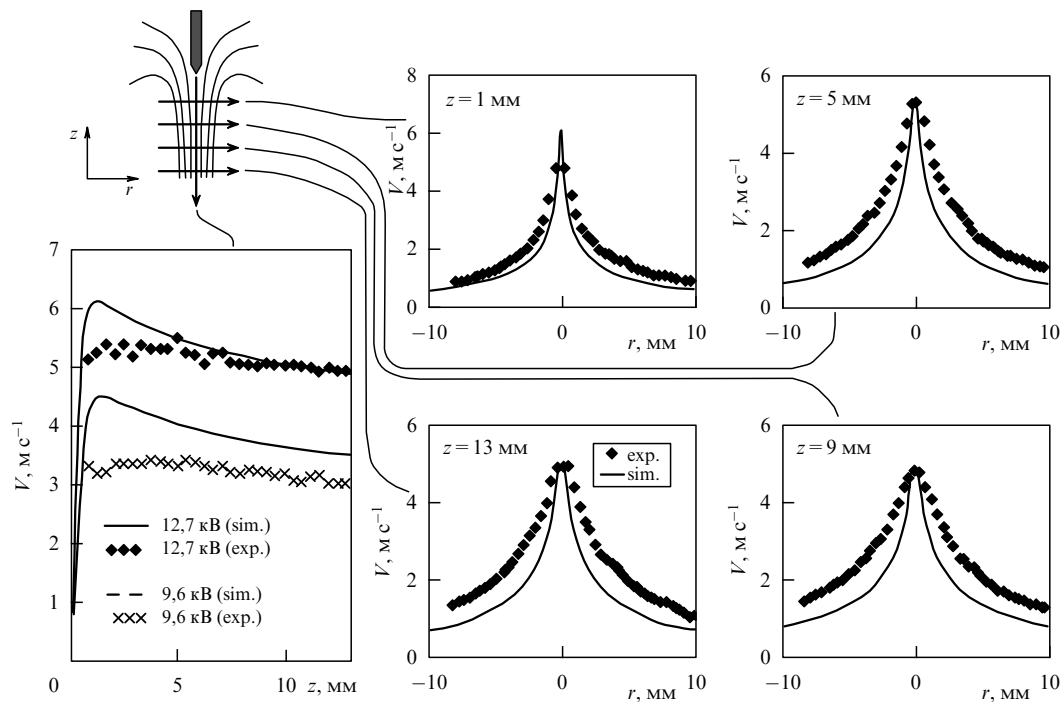


Рис. 18. Поперечные и осевые распределения скорости в системе электродов игла – тор. Поперечные распределения (зависимости от  $r$ -координаты) построены для напряжения 12,7 кВ. Сопоставление эксперимента (exp.) и расчёта (sim.).

(рис. 17б). Примерно на 2–3 мм от оконечности иглы распространяется зона разгона. Можно заметить, что эта зона примерно соответствует области основного распределения объёмного заряда (рис. 17а) и области действия объёмной силы. Далее пролегает область медленного вязкого расширения струи, скорость здесь почти неизменна.

Аналогичное сравнение проведено для электрического ветра отрицательной полярности в системах сфера – тор, игла – плоскость, показано хорошее соответствие расчёта и эксперимента [48] (рис. 18). Здесь сравнились результаты расчёта в униполярной модели (6) с экспериментальными данными — вольт-амперными характеристиками и полями скоростей, полученными PIV-методом. На рисунке 18 приведены распределения скорости в системе электродов игла – плоскость. Структура течения напоминает положительную полярность (ср. с рис. 17). Из различий следует отметить большую ширину струи (на расстоянии в 8–9 мм при отрицательной полярности радиус струи, на котором скорость вдвое меньше максимума, порядка 4 мм, а при положительной — порядка 1 мм) и меньшую зону разгона.

## 7. Заключение

- Современные экспериментальные исследования коронного разряда показали существенные различия структуры чехла КР в зависимости от полярности коронирующего электрода.

- Структура чехла отрицательного КР имеет очаговый характер, светлая зона отрицательного КР имеет грибовидную форму.

- Структура чехла положительного КР имеет облегающую форму — тонкий светящийся слой, облегающий поверхность электрода.

- Компьютерное моделирование КР позволило объяснить зависимость структуры чехла КР от полярности коронирующего электрода и выявить особенности зоны ионизации.

- Зона ионизации отрицательного КР имеет яйцевидную форму и отстоит от поверхности шарового электрода. Зона ионизации положительного КР имеет форму тонкого слоя, облегающего сферический электрод. Светлая зона отрицательного КР существенно больше зоны ионизации, для положительного КР размеры и форма зоны ионизации и светлой области совпадают.

- Упрощённая модель ЭВ, использующая оригинальное граничное условие, точнее описывает структуру ЭВ, чем более ранние модели, построенные в униполярном приближении.

## Список литературы

1. Райзер Ю П *Физика газового разряда* (Долгопрудный: Интеллект, 2009); Пер. на англ. яз.: Raizer Yu P *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer, 1997)
2. Ватажин А Б, Лихтер В А, Улыбышев К Е *Изв. РАН. Механика жидкости и газа* (2) 78 (2012); Vatazhin A B, Likhter V A, Ulybyshev K E *Fluid Dynamics* 47 206 (2012)
3. Верещагин И П *Коронный разряд в аппаратах электронной технологии* (М.: Энергоатомиздат, 1985)
4. Fridman A, Chirokov A, Gutsol A *J. Phys. D* 38 (2) R1 (2005)
5. Pai D Z, Lacoste D A, Laux C O *J. Appl. Phys.* 107 093303 (2010)
6. Akishev Yu et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* 14 (2) S18 (2005)
7. Yang F et al., in *High Voltage Engineering. Proc. of the XIIIth Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands, 25–29th August 2003* (Ed. J J Smit) (Rotterdam: Millpress, 2003) p. 155
8. Go D et al. *J. Appl. Phys.* 102 053302 (2007)
9. Korchemkin I N, Stishkov Yu K, in *Abstracts of the 5th Intern. Conf. on Materials Science and Condensed Matter Physics and of Symposium "Electrical Methods of Materials Treatment" in Memoriam of Acad. Boris Lazarenko, Chisinau, Moldova, 2010*, p. 266
10. Chen I Y et al. *Int. J. Heat Mass Transfer* 57 285 (2013)

11. Ong A O, Abramson A R, Tien N C *J. Heat Transfer* **136** 061703 (2014)
12. Siswanto W A, Ngui K *Australian J. Basic Appl. Sci.* **5** 1433 (2011)
13. Ianculescu R, Sohar D, Mudrik M *J. Electrostat.* **69** 512 (2011)
14. Léger L et al. *J. Electrostat.* **51–52** 300 (2001)
15. Léger L, Moreau E, Touchard G *J. Electrostat.* **64** 215 (2006)
16. El-Khabiry S, Colver G M *Phys. Fluids* **9** 587 (1997)
17. Colver G M, El-Khabiry S *IEEE Trans. Industry Appl.* **35** 387 (1999)
18. Vilela Mendes R, Dente J A *J. Fluids Eng.* **120** 626 (1998)
19. Zhao L, Adamiak K *J. Electrostat.* **63** 337 (2005)
20. Takeuchi N, Takubo K, in *Proc. of the Intern. Symp. on Electrohydrodynamics, ISEHD 2014, Okinawa, Japan, June 2014*
21. Mista W, Kacprzyk R *Catalysis Today* **137** 345 (2008)
22. Lai F C, Sharma R K *J. Electrostat.* **63** 223 (2005)
23. Boeuf J P, Pitchford L C *J. Appl. Phys.* **97** 103307 (2005)
24. Novák I, Pollák V, Chodák I *Plasma Process. Polymers* **3** 355 (2006)
25. Kim W et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2545 (2006)
26. Lukes P et al. *J. Phys. D* **38** 409 (2005)
27. Malik M A, Ghaffar A, Malik S A *Plasma Sources Sci. Technol.* **10** 82 (2001)
28. Grabowski L R et al. *Plasma Chem. Plasma Process.* **26** 3 (2006)
29. Nagato K et al. *Int. J. Mass Spectrom.* **248** 142 (2006)
30. Dordizadeh P, Adamiak K, Peter Castle G S *J. Phys. D* **48** 415203 (2015)
31. Kasdi A *J. Electrostat.* **81** 1 (2016)
32. Dastoori K et al. *J. Electrostat.* **71** 351 (2013)
33. Shemshadi A, Niayesh K, Akbari A *Phys. Plasmas* **19** 073506 (2012)
34. Самусенко А В, Стишков Ю К *Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей* (СПб.: ВВМ, 2011)
35. Zubkov T N, Samusenko A V, Stishkov Yu K *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **49** 474 (2013)
36. Самусенко А В, Сафронова Ю Ф, Стишков Ю К *Электронная обработка материалов* **52** (5) 43 (2016)
37. Luque A et al. *Appl. Phys. Lett.* **90** 081501 (2007)
38. Stishkov Yu K, Samusenko A V *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **44** 271 (2008)
39. Винайкин М Ю, Зуев Д В, Стишков Ю К, в сб. *IX Междунар. научная конф. "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей"*, Санкт-Петербург, 22–26 июня 2009 года. Сборник докладов (СПб.: Соло, 2009) с. 217
40. Stishkov Yu, Samusenko A, Vinaykin M, Zuev D, in *Proc. of Intern. Symp. on Electrohydrodynamics, Malaysia, 2009*
41. Hamdi M et al. *Exp. Fluids* **55** 1702 (2014)
42. Kriegseis J et al., in *Proc. of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, 09–12 January 2012* (Reston, Va.: AIAA, 2012) p. AIAA 0406
43. Adamiak K *J. Electrostat.* **71** 673 (2013)
44. Kaiser S, Fahlenkamp H, in *Proc. of the Intern. Symp. on Electrohydrodynamics, 23–26 September 2012, Gdańsk, Poland*, p. 101
45. Talaie M R, Taheri M, Fathikalajahi J *J. Electrostat.* **53** 221 (2001)
46. Nouri H, Zebboudj Y *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **49** 11001 (2010)
47. Samusenko A, Stushkov Yu, Zhidkova P *Int. J. Plasma Environment. Sci. Technol.* **9**(1) 24 (2015)
48. Ашихмин И А, Самусенко А В, Стишков Ю К, Яковлев В В *ЖТФ* **60** 65 (2015); Ashikhmin I A, Samusenko A V, Stishkov Yu K, Yakovlev V V *Tech. Phys.* **60** 1637 (2015)
49. Ashikhmin I, Stishkov Yu K, Yakovlev V *Int. J. Plasma Environment. Sci. Technol.* **9** 13 (2015)

### Corona discharge and electrogasdynamic flows in the air

**Yu.K. Stishkov, A.V. Samusenko, I.A. Ashikhmin**  
 Saint Petersburg State University,  
 Universitetskaya nab. 7-9, 199034 St. Petersburg, Russian Federation  
 E-mail: y.stishkov@spbu.ru, andreys2004@yandex.ru

A corona discharge is closely related to electrogasdynamic flows (electric wind) accompanying it. These phenomena were considered in numerous studies and described in several monographs. Usually, they are investigated separately because it is assumed that electric wind develops exclusively in the external region of the corona discharge. However, because a distinct boundary between the ionization layer and the external region is absent, the relation between these processes is investigated in a number of current works treating these phenomena in conjunction with each other. The results presented in the paper were mainly obtained in such studies.

**Keywords:** corona discharge, electrogasdynamics, electric wind

PACS numbers: **52.70. – m**, 52.80.Hc

Bibliography — 49 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (12) 1331–1345 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>

Received 4 August 2017, revised 24 April 2018

*Physics – Uspekhi* **61** (12) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.06.038358>