

04

## Механизм пробоя высокочастотного разряда со струйными электролитическими электродами

© В.С. Желтухин<sup>1</sup>, Ал.Ф. Гайсин<sup>2</sup>, С.Ю. Петряков<sup>1</sup><sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия  
E-mail: almaz87@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 16 июля 2022 г.

Принято к публикации 18 июля 2022 г.

Описан физический механизм возникновения кольцевых и полукольцевых плазменных структур вокруг струи электролита в высокочастотном разряде с жидкими струйными электродами. Показано, что напряженность электрического поля в области распада струйного течения может достигать значений  $10^9 - 10^{10}$  В/м, при которых возможна автоэлектронная эмиссия, ведущая к появлению в окрестности струи первичных электронов, что приводит к ионизации и возбуждению молекул окружающей газовой среды.

**Ключевые слова:** плазменно-жидкостные системы, высокочастотный разряд, электролиты, численные методы.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53283.19237

Плазменно-жидкостные системы относятся к интенсивно развивающейся междисциплинарной области исследований, включающей в себя физику газового разряда, гидрогазодинамику, термодинамику, химию многофазных систем, плазмохимию [1]. В плазменно-жидкостных системах один или оба электрода представляют собой электролит, к которому подведен переменный или постоянный ток. В случае двух жидких электродов один или оба являются проточными [2]. Интерес к исследованию плазменно-жидкостных систем не в последнюю очередь обусловлен их потенциалом применения на практике, например, для обработки поверхности металлов [3], получения мелкодисперсных порошков [4], очистки воды и воздуха [5] и др.

В предыдущих работах [6,7] представлены результаты экспериментальных исследований высокочастотного (ВЧ) разряда между двумя струйными электролитическими электродами в диапазоне давлений окружающей атмосферы от  $10^3$  до  $10^5$  Па. В этих экспериментах обнаружены различные светящиеся кольцевые или полукольцевые структуры, которые образуются в области распада струйного течения. В то же время вопросы механизма формирования кольцевых плазменных структур остаются открытыми.

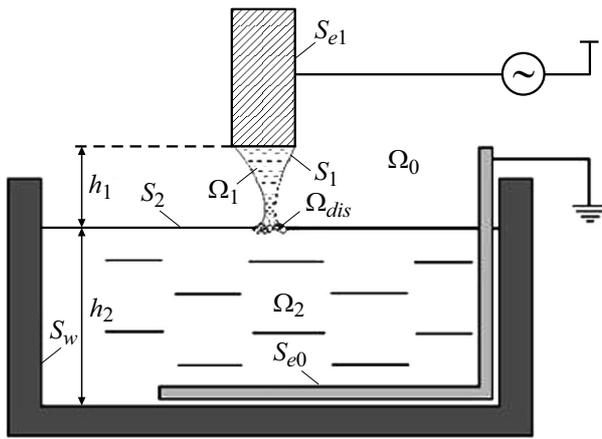
Целью настоящей работы является обоснование механизма формирования кольцевых плазменных структур на базе проведенных экспериментальных и численных исследований.

Известно, что для пробоя необходимо наличие свободных (первичных) заряженных частиц и электрического поля, придающего им направленное движение [8]. В газовом разряде между металлическими электродами источником первичных электронов является эмиссия их

с поверхности катода или ионизация газа вследствие естественной радиоактивности и космических излучений. В электролите в отличие от металла нет свободных электронов; заряженные частицы в электролитах представлены отрицательными и положительными ионами. Спонтанная ионизация в результате естественной радиоактивности или космических излучений в данном случае также не играет существенной роли, так как зачастую разряд возникает при распаде струи еще до момента отрыва капли [6]. Поэтому для определения механизма возникновения светящихся структур и пробоя струи при горении разряда между двумя электролитическими электродами рассмотрено электрическое поле, индуцированное током струи.

Предположим, что струя электролита, свободно истекающая вертикально из подающего устройства, симметрична относительно оси потока. Сечение струи уменьшается по мере удаления от источника, так что профиль ее представляет собой усеченный конус, плавно переходящий в синусоиду с уменьшающейся амплитудой. Радиус сечения струи в месте истечения 2.5 мм, максимальная амплитуда синусоиды профиля в конце струи 2.0 мм; конус переходит в синусоидальный профиль на расстоянии  $z = 5$  мм от источника. Период синусоиды 5 мм. Эта схема является приближением к реальному профилю струйного электрода, который наблюдается в экспериментах (рис. 1) [6,7].

Введем локальную систему координат  $Oxuz$  с началом в центре выходного отверстия подающей трубки так, что положительное направление оси  $Oz$  совпадает с направлением потока. На подводящую трубку подается ВЧ-ток  $\tilde{I} = I_m \exp(i\omega t)$ , где амплитуда  $I_m = 12 - 17$  А



**Рис. 1.** Схема областей разряда с жидкими электродами.  $\Omega_0$  — область, занимаемая газом,  $\Omega_1$  — область, занимаемая струйным электродом,  $\Omega_2$  — область жидкого электрода в электролитической ванне,  $\Omega_{dis}$  — область парогазового разряда,  $S_{e0}$  — поверхность заземленного электрода,  $S_{e1}$  — поверхность подводящей трубки,  $S_1$  — свободная поверхность струи,  $S_2$  — свободная поверхность жидкости в электролитической ванне,  $S_w$  — поверхность стенок электролитической ванны,  $h_1$  — длина струи,  $h_2$  — глубина электролитической ванны.

согласно результатам ранее выполненных экспериментальных исследований [7].

Переменный ток  $\vec{j} = (0, 0, \tilde{j}_z) \sim \exp(i\omega t)$ , протекающий вдоль направления  $Oz$ , индуцирует электромагнитное поле, компоненты которого  $\vec{B} = (0, \tilde{B}_\varphi, 0) \sim \exp(i\omega t)$ ,  $\vec{E} = (\tilde{E}_r, 0, \tilde{E}_z) \sim \exp(i\omega t)$ , где  $\vec{B}$ ,  $\vec{E}$  — векторы магнитной индукции и электрической напряженности,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $f$  — частота тока,  $i$  — мнимая единица ( $i^2 = -1$ ). Если  $I_m, j_{m,z}$  — амплитудные значения тока и плотности тока соответственно,  $r_c = r_c(z)$  — текущий радиус струи, то

$$j_{m,z}(z) = I_m / \pi r_c^2(z). \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что при сужении струи плотность тока увеличивается обратно пропорционально уменьшению радиуса (рис. 2). При токе  $I_m = 12-17$  А амплитуда плотности тока в струе достигает значений  $j_{m,z} \sim 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Введем магнитный векторный потенциал  $\tilde{A}$ , так что  $\tilde{B} = \nabla \times \tilde{A}$ . Подставляя его в уравнения Максвелла

$$\nabla \times \tilde{H} = \tilde{j} + \frac{\partial \tilde{D}}{\partial t}, \quad \nabla \times \tilde{E} = -\frac{\partial \tilde{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \tilde{B} = 0, \quad \nabla \cdot \tilde{D} = 0, \quad (3)$$

$$\tilde{B} = \mu_0 \tilde{H}, \quad \tilde{D} = \epsilon_0 \tilde{E} \quad (4)$$

и используя метод комплексных амплитуд [9], получим

$$\nabla \times \tilde{E} = -\frac{\partial \tilde{B}}{\partial t} = -i\omega \mathbf{B}_A \exp(i\omega t) = -i\omega \tilde{B}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{B}_A$  — вектор комплексной амплитуды,  $\tilde{B} = \mathbf{B}_A \exp(i\omega t)$ . Отсюда

$$\tilde{B} = \frac{i}{\omega} \nabla \times \tilde{E} = \nabla \times \tilde{A}. \quad (6)$$

Таким образом,  $\tilde{E} = -i\omega \tilde{A}$ .

Введем векторы комплексных амплитуд  $\tilde{j}_m, \tilde{H}_m, \tilde{E}_m, \tilde{A}_m$  по формулам

$$\begin{aligned} \tilde{j} &= \tilde{j}_m \exp(i\omega t), & \tilde{H} &= \tilde{H}_m \exp(i\omega t), \\ \tilde{E} &= \tilde{E}_m \exp(i\omega t), & \tilde{A} &= \tilde{A}_m \exp(i\omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

Для векторов комплексных амплитуд получим соотношения

$$\begin{aligned} \nabla \times \tilde{H}_m &= \tilde{j}_m + i\epsilon_0 \epsilon \omega \tilde{E}_m, \\ \nabla \times \tilde{E}_m &= -i\mu_0 \omega \tilde{H}_m, \quad \tilde{E}_m = -i\omega \tilde{A}_m. \end{aligned} \quad (8)$$

Применяя к комплексным амплитудам закон Био–Савара, получим

$$\tilde{E}_m(\mathbf{r}_0) = -i\omega \tilde{A}_m(\mathbf{r}_0) = -i\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\tilde{j}_m(\mathbf{r}) dV}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|}. \quad (9)$$

Здесь  $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}$  — радиус-векторы. Из уравнения (9) с учетом зависимости (1) следует, что вещественные компоненты амплитуд комплексной электрической напряженности на границе струи равны

$$\begin{aligned} \text{Re} E_{m,r}(r_c, z) &= \frac{I_m \omega}{2\pi \epsilon_0 r_c^2(z)} \frac{\partial r_c}{\partial z}, \\ \text{Re} E_{m,z}(r_c, z) &= -\frac{I_m \omega}{\pi \epsilon_0 r_c^2(z)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Расчеты показали, что значения напряженности электрического поля на поверхности струи достигают максимальных значений  $\geq 10^9$  В/м в точках локального минимума радиуса течения (рис. 3). При таких значениях напряженности электрического поля возможен туннельный эффект [10], что приводит к эмиссии электронов из отрицательно заряженных ионов у поверхности струи. Туннельный эффект представляется наиболее вероятной причиной возникновения первичных электронов. Это приводит к последующему пробоя в областях распада струи и перехода ее в капельное течение, а также к возникновению кольцевых и полукольцевых диффузных плазменных структур.

Уменьшение сечения струи в области распада приводит к квадратичному увеличению плотности тока и соответственно нагреву струи до температуры кипения, как показывают результаты экспериментов [6,7,11]. При этом возникает парогазовый пузырь, течение прерывается, сопротивление струи резко увеличивается, что вызывает скачки напряжения до 10–20 кВ и тока до 10–20 А.

Эффект зажигания разряда в разных местах струи и разные формы плазменного образования, представленные в работах [6,7], объясняются взаимодействием неустойчивостей Френкеля–Тонкса и Рэлея–Тейлора [12], которые развиваются соответственно в жидкости, находящейся в электрическом поле, и в жидкости,

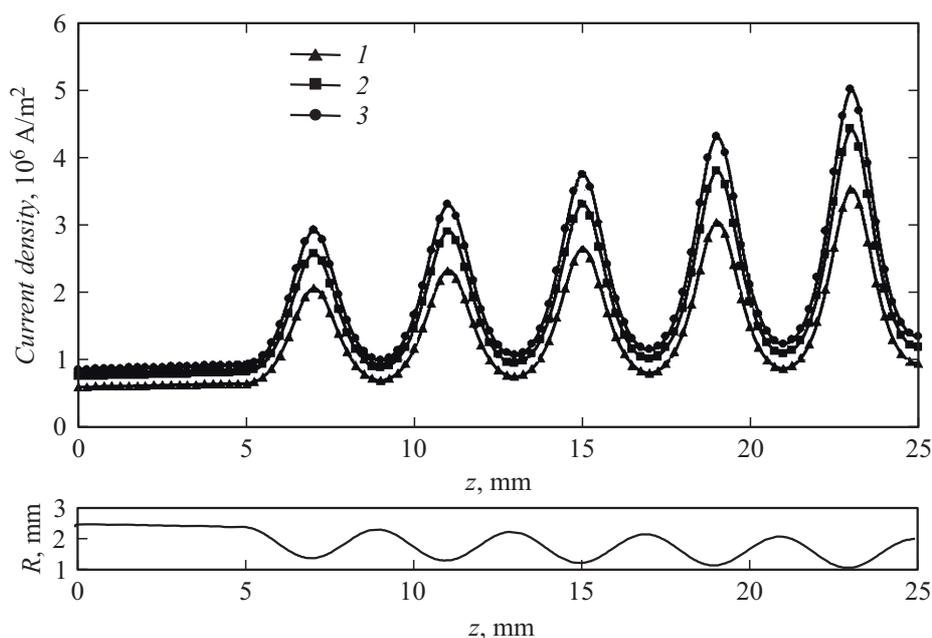


Рис. 2. Плотность тока в струе при значениях тока  $I = 12$  (1),  $15$  (2) и  $17$  А (3). Внизу приведен профиль струйного электрода.

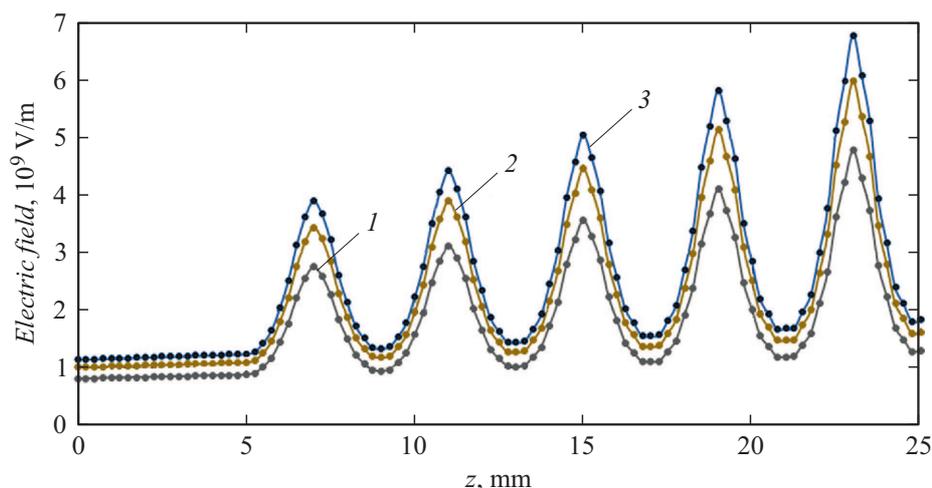


Рис. 3. Напряженность электрического поля  $\text{Re}E_{m,z}$  при значениях тока  $I = 12$  (1),  $15$  (2) и  $17$  А (3).

движущейся с ускорением (вертикально истекающей струе).

В результате расчета напряженности электрического поля, индуцируемого током, протекающим по струе электролита в разряде между двумя электролитическими электродами, установлено, что в зонах распада струи электролита амплитуда напряженности электрического поля достигает значений  $\text{Re}E_{m,z} \geq 10^9$  В/м, а плотности тока  $j_{m,z} \geq 10^6$  В/м<sup>2</sup>. В местах пучности тока струя нагревается до температуры кипения, что приводит к появлению парогазовой области. Под действием электрического поля в местах сужения струи и в парогазовой области в результате автоэлектронной эмиссии (туннельный эффект) появляются свободные электроны. Это

приводит к пробое парогазовой области и возникновению кольцевых и полукольцевых плазменных структур.

Таким образом, полученные численные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными и существующими представлениями о взаимодействии электрического поля с материалами.

#### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P.J. Bruggeman, A. Bogaerts, J.M. Pouvesle, E. Robert, E.J. Szili, *J. Appl. Phys.*, **130** (20), 200401 (2021). DOI: 10.1063/5.0078076
- [2] N.F. Kashapov, R.N. Kashapov, L.N. Kashapov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51** (49), 494003 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aac334
- [3] A.F. Gaysin, A.K. Gilmutdinov, *Inorg. Mater. Appl. Res.*, **12** (3), 633 (2021). DOI: 10.1134/S2075113321030102
- [4] T.A. Kareem, A.A. Kaliani, *Ionics*, **18** (3), 315 (2012). DOI: 10.1007/s11581-011-0639-y
- [5] Ю.С. Акишев, М.Е. Грушин, В.Б. Каральник, А.Е. Монич, М.В. Панькин, Н.И. Трушкин, В.П. Холоденко, В.А. Чугунов, Н.А. Жиркова, И.А. Ирхина, Е.Н. Кобзев, *Физика плазмы*, **32** (12), 1142 (2006). [Yu.S. Akishev, M.E. Grushin, V.B. Karal'nik, A.E. Monich, M.V. Pan'kin, N.I. Trushkin, V.P. Kholodenko, V.A. Chugunov, N.A. Zhirkova, I.A. Irkhina, E.N. Kobzev, *Plasma Phys. Rep.*, **32** (12), 1052 (2006). DOI: 10.1134/S1063780X06120087].
- [6] Ал.Ф. Гайсин, Ф.М. Гайсин, В.С. Желтухин, Э.Е. Сон, *Физика плазмы*, **48** (1), 71 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122010061 [Al.F. Gaisin, F.M. Gaisin, V.S. Zheltukhin, E.E. Son, *Plasma Phys. Rep.*, **48** (1), 48 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22010068].
- [7] А.Ф. Гайсин, Э.Е. Сон, С.Ю. Петряков, *Физика плазмы*, **43** (7), 625 (2017). DOI: 10.7868/S0367292117070058 [Al.F. Gaisin, E.E. Son, S.Yu. Petryakov, *Plasma Phys. Rep.*, **43** (7), 741 (2017). DOI: 10.1134/S1063780X17070054].
- [8] Yu.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin, *Gas discharge physics* (Springer, Berlin, 1997).
- [9] Б.З. Каценеленбаум, *Высокочастотная электродинамика. Основы математического аппарата* (Наука, М., 1966).
- [10] Г.И. Сканава, *Физика диэлектриков. Область сильных полей* (Физматгиз, М., 1958).
- [11] А.Ф. Гайсин, Н.Ф. Кашапов, Д.Н. Мирханов, А.И. Гайсина, А.В. Корнеев, *Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий*, **1** (10), 109 (2019).
- [12] А.И. Жакин, *УФН*, **183** (2), 153 (2013). DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302c.0153 [A.I. Zhakin, *Phys. Usp.*, **56** (2), 141 (2013). DOI: 10.3367/UFNe.0183.201302c.0153].