

03

## Скорость электрического ветра и КПД преобразования электрической энергии

© Н.М. Верещагин, В.В. Васильев

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
390005 Рязань, Россия  
e-mail: nmver@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 14 марта 2017 г.)

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований скорости электрического ветра и коэффициента полезного действия. Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении на электродной системе „плоский многоострый электрод–две параллельные трубки“.

DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45585.2250

### Введение

Эффект электрического ветра известен давно и широко используется в электротехнологиях [1,2]. В последние годы область применения электрического ветра непрерывно расширяется [3,4]. Скорость электрического ветра сильно зависит от геометрии электродной системы [5,6]. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование показали, что скорость электрического ветра максимальна напротив острия и убывает к периферии. Максимальная ее величина лежит в диапазоне 1–5 м/с в зависимости от конструкции электродной системы [3–5]. В многокаскадных конструкциях электродных систем получают направленный поток воздуха со скоростью более 5 м/с [7,8].

Известно, что скорость электрического ветра пропорциональна корню квадратному из плотности тока [2], и обратно пропорциональна корню квадратному из подвижности ионов [5].

Представляет интерес исследование путей увеличения скорости электрического ветра и определение коэффициента полезного действия преобразования электрической энергии в кинетическую энергию воздушного потока в коронном разряде.

### Теоретическая часть

Будем рассматривать униполярный коронный разряд, во внешней области которого ионы движутся от коронирующего электрода, создавая плотность электрического тока  $j = enV_i$ , где  $n$  — концентрация ионов,  $V_i$  — скорость ионов. Энергия, затрачиваемая полем на перемещение заряда от одного электрода до второго, равна произведению заряда  $q$ , находящегося в объеме, на напряжение  $U$ , приложенное к электродам  $W = qU$ . Будем считать, что коронный разряд занимает объем в виде конуса с вершиной на острие коронирующего электрода. Тогда суммарный заряд ионов, находящийся в конусе, можно определить следующим выражением  $q = jLS/(3V_i)$ , где  $S$  — площадь основания конуса,  $L$  —

межэлектродное расстояние. С учетом того, что скорость ионов пропорциональна напряженности электрического поля  $V_i = \mu U/L$ , где  $\mu$  — подвижность ионов, а  $U/L$  — средняя напряженность электрического поля, получим:  $q = jL^2S/(3\mu U)$ . Отсюда энергия, затрачиваемая полем, по перемещению заряда на расстояние  $L$  будет равна  $W = qU = jL^2S/(3\mu)$ . Будем считать, что вся эта энергия при соударениях ионов передается молекулам воздуха, заключенным в цилиндре длиной  $L$  с площадью основания  $S$ . Масса воздуха, заключенного в этом объеме, определим по формуле  $m = \rho LS$ , где  $\rho$  — плотность воздуха. В результате взаимодействия ионов с молекулами воздуха последние разгонятся до скорости  $V$ , приобретая энергию  $mV^2/2$ . Приравняв энергию, затрачиваемую электрическим полем, к кинетической энергии воздушного потока, получим формулу для расчета скорости воздуха

$$V = \sqrt{\frac{2jL}{3\mu\rho}}. \quad (1)$$

Такой же результат получается при расчете скорости ветра  $V$  из условия равенства давлению заряда  $P_1 = qE/S$  на поверхность площадью  $S$ , давлению ветра  $P_2 = \rho V^2/2$  на площадь той же величины. Приравняв эти выражения  $P_1 = P_2$  и преобразовав, получим ту же формулу для скорости:

$$V^2 = \frac{2qE}{\rho S} = \frac{2LI E}{\rho S 3V_i} = \frac{2jL}{3\mu\rho}.$$

Зная скорость газа  $V$  и затрачиваемую мощность  $P = UI$ , где  $I$  — сила тока, можно рассчитать коэффициент полезного действия преобразования электрической энергии в кинетическую энергию газового потока:

$$\eta = \frac{\bar{m}V^2}{2UI}, \quad (2)$$

где  $\bar{m} = \rho SV$  — массовый расход воздуха. После подстановки скорости воздуха получим:

$$\eta = V/(3V_i). \quad (3)$$

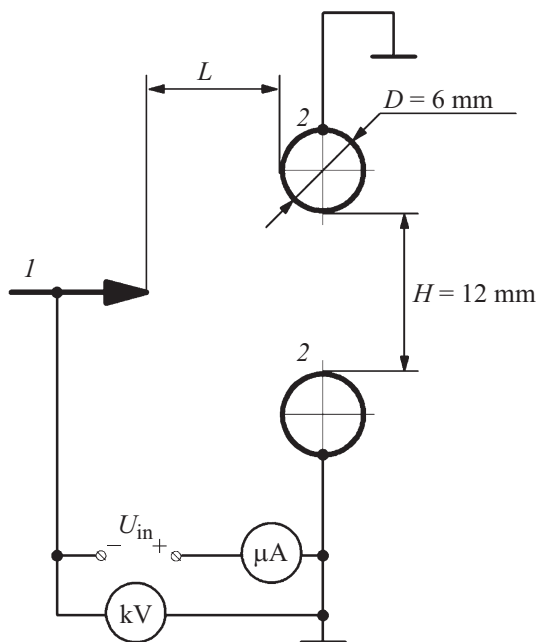
## Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования проводились при отрицательном коронном разряде на установке, приведенной на рис. 1.

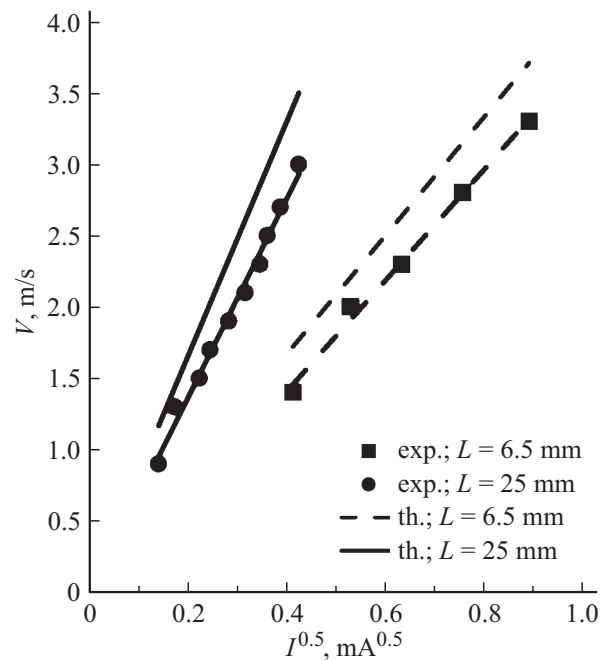
Экспериментальная установка состоит из электродной системы, содержащей коронирующий  $I$  и некоронирующий электроды  $2$ , которые подключены к высоковольтному источнику питания  $U_{in}$ . Напряжение измерялось киловольтметром С90, а ток — микроамперметром М265М. Коронирующий электрод изготовлен из пластины нержавеющей стали, одна сторона которой имеет зубья треугольной формы (всего 22 зуба). Вершины зубьев задают фиксированные точки зажигания разряда. Некоронирующие электроды выполнены в виде трубок диаметром 6 мм и расположены параллельно между собой на расстоянии  $H = 12$  мм. Коронирующий электрод располагался симметрично на расстоянии  $L$  от краев трубок некоронирующего электрода. В экспериментах межэлектродное расстояние  $L$  изменялось в диапазоне 6.5–25 мм, а расстояние  $H$  не менялось.

На коронирующий электрод подавалось высокое напряжение отрицательной полярности, некоронирующие электроды находились под нулевым потенциалом.

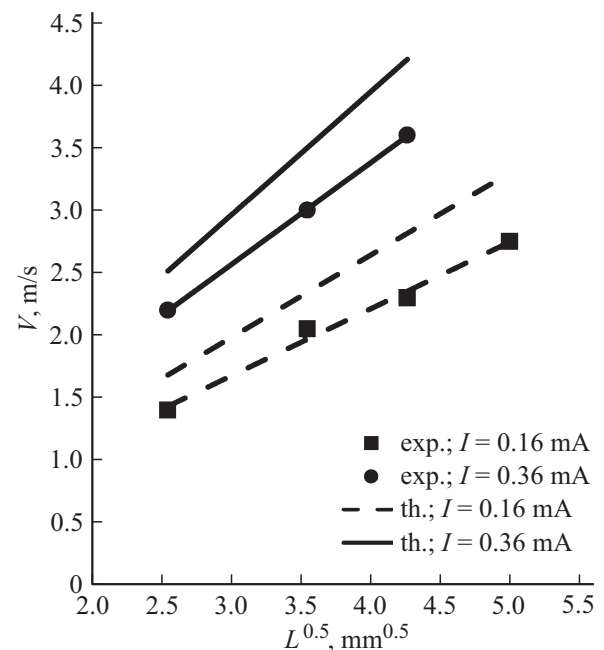
На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости скорости электрического ветра от корня квадратного



**Рис. 1.** Структурная схема конструкции электродной системы и форма коронирующего электрода ( $I$  — коронирующий электрод,  $2$  — некоронирующий электрод).



**Рис. 2.** Зависимость скорости электрического ветра от корня квадратного из тока для различных межэлектродных расстояний.



**Рис. 3.** Зависимость скорости ветра от корня квадратного из межэлектродного расстояния для различных токов.

из тока для различных расстояний между электродами в сравнении с теоретическими зависимостями, рассчитанными по формуле (1). В расчетах принималось:  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

Измерение скорости воздушного потока производилось крыльчатим анемометром Windmate 100. Анемо-

Зависимость КПД от тока коронного разряда

| $L = 12.5 \text{ mm}$ |                  |                |                  |            |                           |
|-----------------------|------------------|----------------|------------------|------------|---------------------------|
| $U, \text{ kV}$       | $I, \mu\text{A}$ | $P, \text{ W}$ | $V, \text{ m/s}$ | $\eta, \%$ | $\eta_{\text{theor}}, \%$ |
| 10                    | 0.03             | 0.3            | 0.9              | 0.15       | 0.21                      |
| 14                    | 0.2              | 2.8            | 2.1              | 0.2        | 0.39                      |
| 16                    | 0.32             | 5.12           | 2.9              | 0.29       | 0.43                      |
| 17                    | 0.38             | 6.46           | 3.3              | 0.34       | 0.45                      |

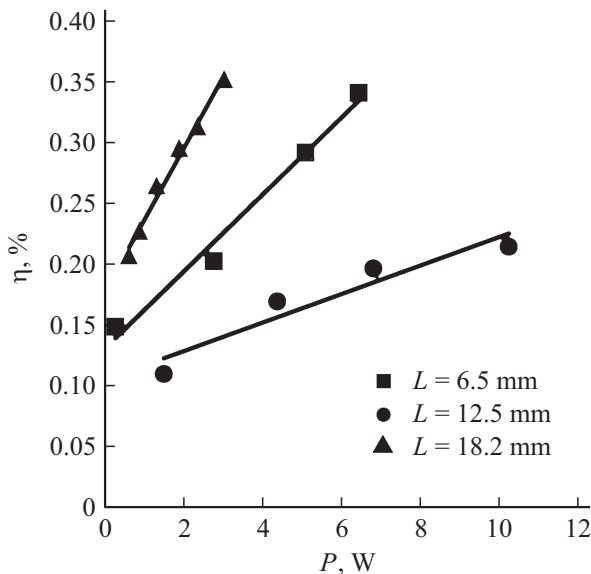


Рис. 4. Зависимость КПД от мощности для различных межэлектродных расстояний.

метр устанавливался на выходе электродной системы на расстоянии 30 мм от некоронирующих электродов. Погрешность измерений составляет  $\pm 3\%$ . Таким образом, происходило измерение средней скорости воздушного потока.

На рис. 3 показаны зависимость скорости электрического ветра от межэлектродного расстояния для разных токов и теоретические зависимости, построенные по формуле (1).

Из зависимостей рис. 2 и 3 видно, что скорость ветра зависит не только от тока, но и от межэлектродного расстояния. Теоретические зависимости достаточно точно согласуются с экспериментальными.

В расчетах средней скорости ионов принималась средняя напряженность электрического поля. Результаты расчета приведены в таблице. Из нее видно, что экспериментальные и рассчитанные по формуле (2) значения КПД близки по величине.

КПД возрастает с увеличением напряжения и межэлектродного расстояния (таблица, рис. 4). В зависимостях (рис. 4) вводимая в разряд мощность была ограничена либо максимальным напряжением источника питания на уровне 17 кВ при большом межэлектродном

расстоянии, либо пробоем промежутка при малом межэлектродном расстоянии.

В соответствии с формулой (2) КПД возрастает пропорционально отношению скорости ветра к скорости ионов. Из таблицы видно, что скорость ветра растет быстрее напряжения приложенного к электродам, т.е. быстрее скорости ионов, что и является причиной увеличения КПД. Возрастание КПД от межэлектродного расстояния также вызвано увеличением рабочего напряжения. В исследуемой конструкции электродной системы КПД возрастал пропорционально напряжению, прикладываемому к электродам.

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1) скорость электрического ветра зависит не только от плотности тока и подвижности ионов, но и от расстояния между электродами и от удельной плотности воздуха. Увеличение межэлектродного расстояния приводит к увеличению скорости ветра, а увеличение плотности воздуха уменьшает скорость;

2) КПД определяется отношением скорости ветра к скорости ионов, возрастает с увеличением мощности, вводимой в разряд, и межэлектродного расстояния. КПД в исследуемой электродной системе не превышал 0.35%.

## Список литературы

- [1] Катцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М.–Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1947. 226 с.
- [2] Верецагин И.П. Коронный разряд в электронно-ионной технологии // М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [3] Ребров И.Е., Хамич В.Ю., Ямщиков В.А. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 8. С. 10–14.
- [4] Ашихмин И.А., Самусенко А.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 11. С. 65–72.
- [5] Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 7. С. 70–76.
- [6] Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 7. С. 1–7.
- [7] Верецагин Н.М., Васильев В.В., Королев А.Е., Шемарин К.В. // Вестник Рязанского гос. радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 149–152.
- [8] Верецагин Н.М., Королев А.Е., Васильев В.В., Шемарин К.В. // Вестник Рязанского гос. радиотехнического университета. 2013. № 4–3 (46). С. 64–67.