

УДК 544.6

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ПОТОКА НА АСИММЕТРИЧНУЮ СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОДОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

М. Малик, Ж. Примас, М. Котек, Д. Ясикова, В. Копецки

Либерецкий технический университет, 46117 Либерец, Чешская Республика
E-mails: michal.malik@tul.cz, jiri.primas@tul.cz, michal.kotek@tul.cz,
darina.jasikova@tul.cz, vaclav.kopecky@tul.cz

Определяется скорость воздушного потока, необходимая для прерывания электрического тока, возникающего при движении ионов между двумя асимметрично расположенными электродами. Проведены эксперименты, результаты которых подтверждают теорию возникновения механических сил в пространстве между двумя асимметричными электродами, на которые подается высокое напряжение. Для определения скорости частиц в потоке воздуха использован оптический метод слежения за частицами. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных. Показано, что они хорошо согласуются.

Ключевые слова: поток воздуха, асимметричная система электродов, электрогидродинамика, высокое напряжение, метод слежения за частицами, велосиметрия.

DOI: 10.15372/PMTF20190101

Введение. Явление возникновения механических сил в пространстве между асимметрично расположенными электродами известно с начала XX в. [1]. В последнее время исследование этого явления вызывает большой интерес [2]. Целью данной работы является объяснение возникновения механических сил в электрогидродинамическом потоке.

Основы теории. В электрогидродинамике возникновение механических сил объясняется движением в газе ионов между двумя электродами с противоположными зарядами [1, 3]. При создании на тонком электроде постоянного тока высокого напряжения (9 кВ) воздух вблизи него ионизируется. Это обусловлено не только высоким напряжением, но и малым размером электрода, поскольку чем меньше диаметр электрода, тем больше напряженность электрического поля [4]. Поскольку размер второго, заземленного, электрода значительно больше размера первого, ионизация воздуха происходит только в окрестности первого электрода. Электроны и ионы с противоположным зарядом притягиваются к тонкому (в виде проволоки) электроду. Поскольку эти частицы находятся в непосредственной близости от электрода, они практически мгновенно попадают на него и разряжаются. Однако положительно заряженные ионы отталкиваются от тонкого электрода и движутся вдоль силовых линий электрического поля к заземленному электроду (рис. 1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства по грантам Чешской Республики (грант № 16-20175S “Скорость диссипации локальной энергии турбулентности в дисперсных системах”) и Министерства образования, молодежи и спорта (грант № LO1201 в рамках Национальной программы по экологической безопасности I).

© Малик М., Примас Ж., Котек М., Ясикова Д., Копецки В., 2019

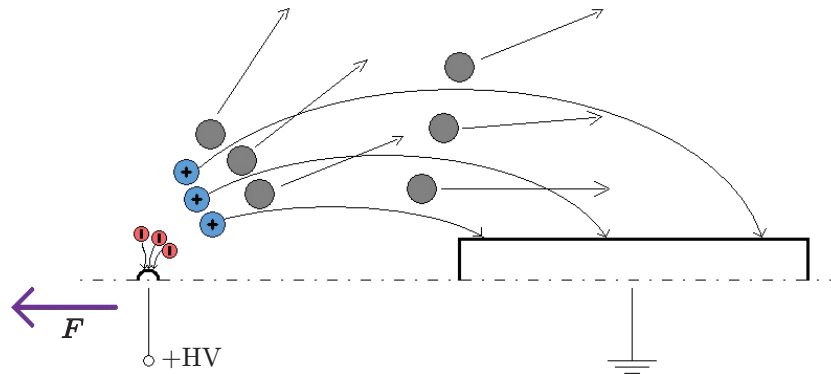


Рис. 1. Схема возникновения механических сил

Несмотря на то что ионы перемещаются в пространстве между двумя электродами, напряженность электрического поля недостаточно велика для возникновения лавинообразной ионизации воздуха (ионизация происходит только в окрестности тонкого электрода). Заряженные частицы, двигаясь в нейтральном воздухе от тонкого электрода к большому заземленному электроду, сталкиваются с нейтральными частицами. При этом ионы на мгновение останавливаются и передают свое количество движения нейтральным частицам. Поскольку это происходит в электрическом поле, под действием его сил частицы продолжают двигаться в прежнем направлении. В процессе столкновений количество движения передается на электроды и заряженные частицы вынуждены двигаться в направлении, совпадающем с направлением электрического поля [5]. Количество движения отдельной частицы чрезвычайно мало, но при ее движении от одного электрода к другому происходит большое количество ее столкновений. К тому же непрерывно генерируется значительное число заряженных частиц, сталкивающихся с нейтральными частицами. Поскольку на нейтральные частицы воздуха электрическое поле не действует, после столкновения с другими частицами они теряют приобретенное количество движения и не переносят его на электроды. Вследствие этого общая сила, действующая на систему электродов, генерируется потоком, направление которого противоположно направлению потока нейтрального воздуха. Эта сила достаточно мала (порядка 10^{-3} Н). Скорость потока нейтрального воздуха составляет приблизительно 1 м/с.

Принимаемые гипотезы. Как сказано выше, возникновение механической силы, действующей на электроды, обусловлено движением в воздухе заряженных частиц. Имеется несколько параметров этого процесса, которые можно измерить. Помимо силы, действующей на электроды, важной величиной является сила тока в межэлектродном пространстве. По силе тока можно судить о количестве заряженных частиц, переместившихся от одного электрода к другому и передавших заряд заземленному электроду, в результате чего образовался замкнутый контур. Выражение для силы F , возникающей в асимметричном конденсаторе, имеет вид [3]

$$F = Il/\mu, \quad (1)$$

где I — сила тока в межэлектродном пространстве; l — расстояние между электродами (в данной работе эта величина обозначена через d); μ — коэффициент подвижности ионов. Из формулы (1) следует, что если сила тока равна нулю, то сила F также равна нулю при отличных от нуля величинах l , μ . Можно поставить эксперимент, в котором поток заряженных частиц не попадает на заземленный электрод, например, вследствие введения в него диэлектрика. Это можно проверить, измерив силу тока. Если окажется, что сила тока равна нулю, то это будет означать, что поток заряженных частиц прерван.

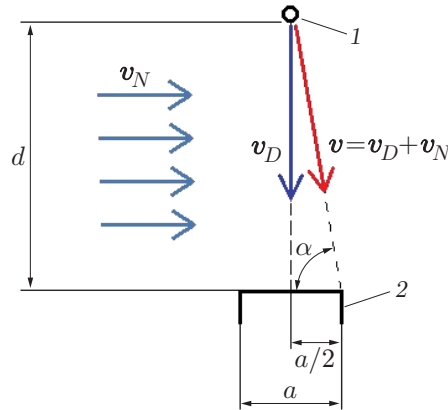


Рис. 2. Взаимодействие потока заряженных частиц с потоком нейтрального воздуха:

1 — тонкий электрод, 2 — большой заземленный электрод

Согласно результатам проведенных ранее исследований заряженные частицы движутся от одного электрода к другому со скоростью дрейфа v_D [6]. Если в пространстве между электродами создать поток нейтрального воздуха с достаточной скоростью v_N , направленные которого перпендикулярно направлению дрейфа заряженных частиц, то поток заряженных частиц не будет попадать на заземленный электрод (рис. 2). Такой поток изменит направление дрейфа частиц. Если скорость v_N достаточно велика по сравнению со скоростью v_D , то заряженные частицы, движущиеся к заземленному электроду, будут “сдуты”. Поскольку заряженные частицы не попадают на заземленный электрод, сила тока равна нулю.

Таким образом, нужно определить скорость потока v_N , при которой направление дрейфа частиц отклоняется на угол α , составляющий не менее 90° (см. рис. 2). Скорость дрейфа частиц определяется по формуле [7]

$$v_D = kE = \frac{dy}{dt}, \quad (2)$$

где y — координата, определяющая положение частицы в вертикальном направлении; t — время; k — коэффициент подвижности ионов; E — напряженность электрического поля. Интегрируя соотношения (2), получаем

$$y = kEt. \quad (3)$$

Скорость, которую приобретает частица вследствие действия нейтрального потока воздуха, равна

$$v_N = \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

(x — координата, определяющая положение частицы в горизонтальном направлении). Интегрируя соотношение (4), получаем

$$tv_N = x. \quad (5)$$

Так как координаты x , y в соотношениях (3), (5) определяют положение частицы в один и тот же момент времени, то

$$x = v_N y / (kE). \quad (6)$$

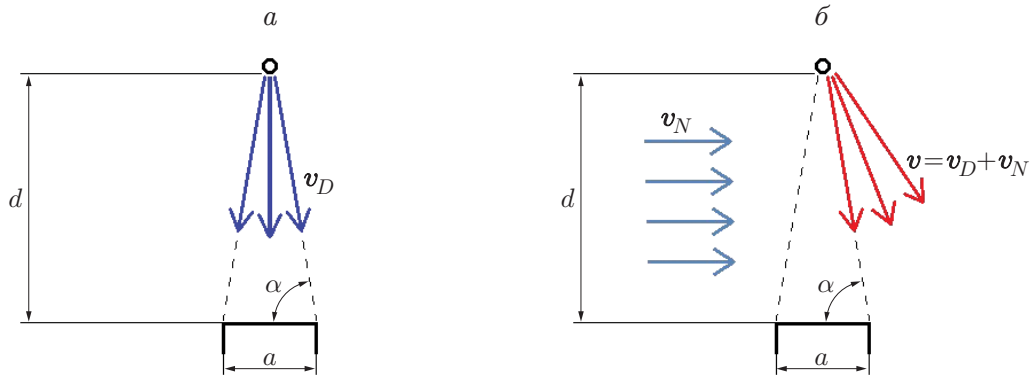


Рис. 3. Аппроксимации векторного поля скорости заряженных частиц (а) и векторного поля скорости заряженных частиц при наличии векторного поля скорости нейтральных частиц воздуха (б)

Условия, при выполнении которых заряженная частица не попадает на заземленный электрод, т. е. “сдувается” с него ($I = 0$), имеют вид (см. рис. 2)

$$y = d, \quad x > a/2, \quad (7)$$

где d — расстояние между электродами; a — ширина заземленного электрода. Используя эти условия в уравнении (6), получаем оценку величины скорости потока нейтрального воздуха, при которой заряженная частица не попадает на заземленный электрод:

$$v_N > akE/(2d). \quad (8)$$

При указанном выше асимметричном расположении электродов сложно получить оценку для напряженности электрического поля. Согласно [6] можно использовать приближенное равенство

$$E = U/d, \quad (9)$$

где U — напряжение в пространстве между электродами. В [6] показано, что асимметричное расположение электродов обусловлено необходимостью генерирования ионов. Используя равенство (9), из неравенства (8) получаем следующую оценку:

$$v_N > akU/(2d^2). \quad (10)$$

Для того чтобы можно было использовать неравенство (10) в эксперименте, необходимо изменить схему, приведенную на рис. 2. Заряженные частицы движутся в пространстве между электродами вдоль густо расположенных силовых линий [8]. Поэтому геометрическую интерпретацию векторного поля скорости v_D нужно изменить. Будем считать, что в треугольнике, вершинами которого являются тонкий электрод и два верхних угла заземленного электрода, векторное поле скорости v_D имеет вид, показанный на рис. 3. Такое векторное поле является некоторой аппроксимацией, достаточной для проводимого исследования.

При использовании схемы, приведенной на рис. 3, величину $a/2$, на которую необходимо сместить заряженную частицу, нужно заменить на величину a . В результате получаем неравенство

$$v_N > akU/d^2. \quad (11)$$

Эксперимент. В эксперименте электроды располагаются асимметрично. Такая схема расположения электродов описана в работах [6, 9]. Большой заземленный электрод представляет собой алюминиевый блок ($10 \times 50 \times 100$ мм), над которым на расстоянии $d = 30$ мм расположена тонкая медная проволока диаметром 0,1 мм, закрепленная с помо-

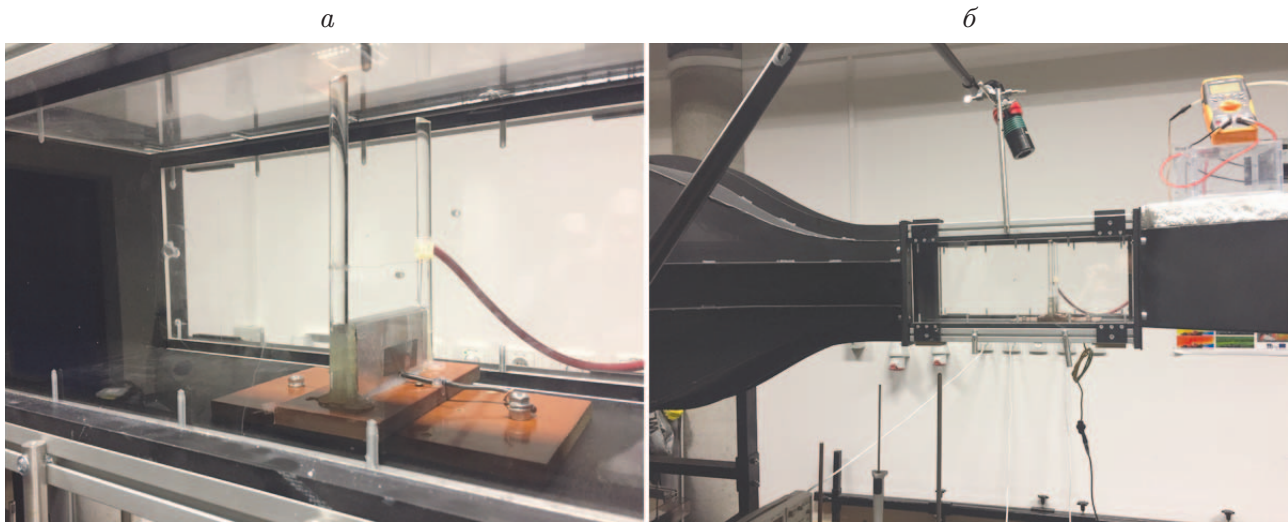


Рис. 4. Схема эксперимента:
a — расположение электродов, *б* — аэродинамическая труба

щью стеклянных стержней (рис. 4, *a*). Данная конструкция помещена в аэродинамическую трубу (рис. 4, *б*), в которой можно создавать поток воздуха с максимальной скоростью, равной 40 м/с. На тонкую проволоку подается напряжение, равное 9 кВ (источник прямого тока высокого напряжения). Большой электрод заземлен. В эксперименте замерялась сила тока на заземленном электроде при скорости потока, не превышающей 20 м/с (большая скорость потока не создавалась вследствие хрупкости тонкого электрода).

Скорость потока воздуха измерялась двумя способами. В первом методе использовались термоанемометры, расположенные на расстоянии 0,5 м от системы электродов. Определенная таким способом скорость рассматривалась как ориентировочная. Второй метод — оптический метод цифровой трассерной визуализации потоков. В исследуемый поток помещались частицы (в данном эксперименте использовались капли оливкового масла), траектории которых отслеживаются. Частицы освещались лазером Nd-YAG, съемка проводилась высокоскоростной камерой с программным обеспечением. Этот метод позволил получить истинное поле скоростей в окрестности электродов и в пространстве между ними. Схема расположения элементов лазерной установки, используемой в методе трассерной визуализации потоков, приведена на рис. 5.

Применимость метода трассирования частиц при наличии электрического поля высокого напряжения показана в работе [10]. В данной работе проведена дополнительная верификация этого метода. Поле скоростей определялось как при наличии электрического поля, так и при его отсутствии (рис. 6). Из результатов сравнения полей скоростей, полученных в этих двух экспериментах, следует, что влияние сил электрического поля на траекторию частиц пренебрежимо мало по сравнению с влиянием сил, действующих со стороны воздушного потока. Незначительное различие полей скоростей может быть вызвано наличием случайной турбулентности в потоке воздуха.

Результаты исследования. После подачи на электроды напряжения, равного 9 кВ, измерялась сила тока в межэлектродном пространстве при различных скоростях воздушного потока (рис. 7). Скорость воздушного потока найдена в результате обработки векторного поля скоростей в межэлектродном пространстве, полученного методом слежения за частицами. Экспериментальные значения аппроксимировались с использованием уравнения линейной регрессии $y = -0,0461x + 1,1263$ ($R^2 = 0,9995$). С увеличением скорости воз-

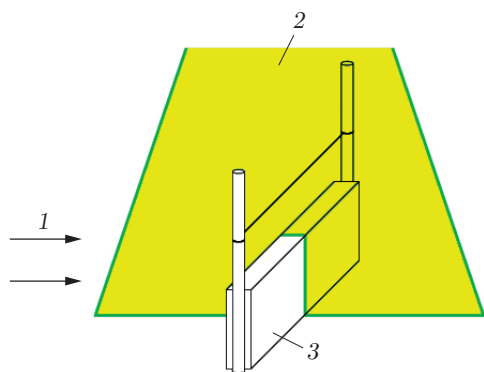


Рис. 5

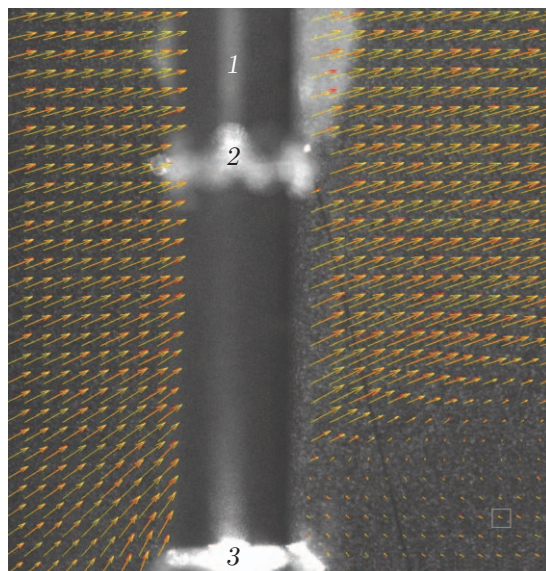


Рис. 6

Рис. 5. Схема расположения лазерного листа и электродов:

1 — поток воздуха в аэродинамической трубе, 2 — лазерный лист, 3 — электроды

Рис. 6. Поля скоростей в межэлектродном пространстве, полученные методом слежения за частицами, при скорости воздушного потока, равной 20 м/с:

темные стрелки — при наличии электрического поля (15 кВ), светлые стрелки — при отсутствии электрического поля; 1 — стеклянная опора, 2 — тонкий электрод, 3 — большой электрод

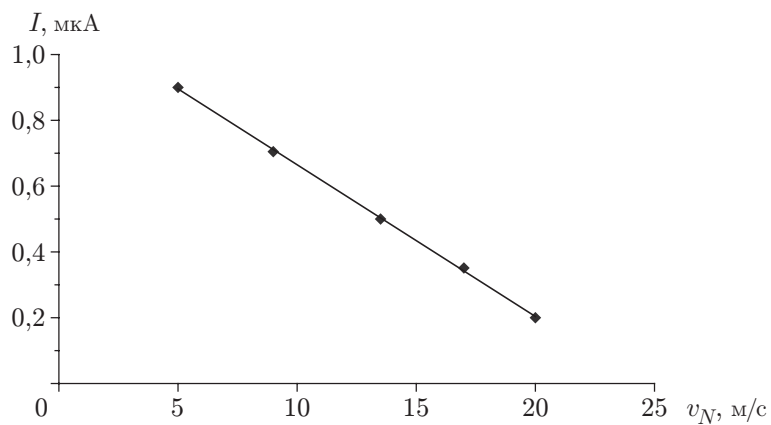


Рис. 7. Зависимость между скоростью воздушного потока v_N и силой электрического тока на заземленном электроде:

точки — эксперимент, линия — линейная регрессия

душного потока сила тока убывает по линейному закону. В эксперименте не была достигнута скорость потока, при которой сила тока обращается в нуль. Однако с использованием уравнения линейной регрессии эту скорость можно определить линейной экстраполяцией

$$I = -0,0461v_N + 1,1263,$$

где $v_N = 1,1263/0,0461 = 24,43$ м/с.

Из неравенства (11) при ширине электрода $a = 10$ мм, расстоянии между электродами $d = 30$ мм, напряжении на тонком электроде $U = 9$ кВ (эти значения использовались в эксперименте) и коэффициенте подвижности ионов $k = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) [11] получаем $v_N > 25$ м/с.

Заключение. В работе объяснено возникновение механических сил в электрогидродинамическом потоке. Получено хорошее соответствие оценок скорости воздушного потока v_N , одна из которых найдена с использованием экспериментальных данных, а другая — на основе используемой теории. С учетом статистической погрешности это соответствие лучше, чем ожидалось, что подтверждает не только правильность принятых гипотез, но и обоснованность теории возникновения механических сил в электрическом поле асимметричного конденсатора. Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов обусловлено использованием метода точного определения скорости частиц. Из результатов проведенных экспериментов также следует, что предложенный метод можно использовать при наличии сильных электрических полей (порядка 10 кВ/см) и высокого напряжения (порядка десятков киловольт).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pat. 300311 UK.** A method of and an apparatus or machine for producing force or motion / Т. Т. Brown. Publ. 15.11.1928.
2. **Tajmar M.** Biefeld — Brown effect: misinterpretation of corona wind phenomena // AIAA J. 2004. V. 42, N 2. P. 315–318.
3. **Bahder T., Fazi Ch.** Force on an asymmetrical capacitor. Adelphi: Army Res. Lab., 2003. ARL-TR-3005.
4. **Akopjan A.** High voltage techniques. Prague: SNTL, 1956.
5. **Jackson J. D.** Classical electrodynamics. N. Y.: Wiley, 1998.
6. **Košek J., Primas J., Malík M., Richter A.** Approximation of strong electric field // Proc. of the conf. “Advance methods in the theory of electric engng”, Pilsen, Sept. 7–9, 2009. Pilsen: Univ. West Bohemia, 2009. P. 13–14.
7. **Canning F. X., Melcher C., Winet E.** Asymmetrical capacitors for propulsion: Rep. / Inst. for Sci. Res. N NASA/CR-2004-213312. Fairmont, 2004.
8. **Adamiak K.** Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review // J. Electrostat. 2013. V. 71, N 4. P. 673–680.
9. **Primas J., Malík M., Jašíková D., Kopecký V.** Force on high voltage capacitor with asymmetrical electrodes // Proc. of the WASET 2010 conf. Amsterdam: S. n., 2010. P. 335–339.
10. **Mizeraczyk J., Kocik M., Dekowski J., et al.** Measurements of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method // J. Electrostat. 2001. V. 51. P. 272–277.
11. **Tipler P. A.** Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Heidelberg: Spektrum Verlag, 2004.

*Поступила в редакцию 17/V 2018 г.,
после доработки — 12/VII 2018 г.
Принята к публикации 24/IX 2018 г.*