

УДК 533.9.082.5.
 EDN: GKGBHV

PACS: 52.25.Dg.



Явления в коронном разряде над дисперсными электродами

*В. Л. Бычков, Д. Е. Сороковых, П. А. Горячкин,
Д. В. Бычков, В. А. Черников*

Приведены данные по экспериментам с разрядами над диэлектриками в виде порошка из Al_2O_3 . Разряды развивались под верхним электродом в виде иглы, или набора игл. В качестве нижнего электрода использовалась кювета, заполненная дисперсным веществом, к которой подводилось заземление. На поверхности порошка появляется воронка (воронки), или сложные остроконечные структуры, более сложные фигуры, и др. под действием гидродинамических потоков.

Ключевые слова: коронный разряд, дисперсные материалы, электрогидродинамические явления, ионный ветер, структуры, плазма.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-22-26

Введение

Интерес к применению разрядов над поверхностью дисперсных материалов в воздухе носит практический характер [1, 2]. Это связано с задачами обеззараживания воздуха, зерна, улучшением плодородия почвы, модификации ее компонентов, изменением свойств порошков – их проводимости, химического состава, генерацией в них активных частиц [1–7].

Следует отметить отличие таких разрядов от классического коронного разряда [8–13] наличием нижнего электрода, наполненного веществом, которое нелинейно влияет на про-

текание тока, изменяет вольтамперные характеристики разряда и состав среды над поверхностью материала.

Разряд с отрицательным верхним электродом может стимулировать развитие пондеромоторных сил [14, 15] и различных гидродинамических неустойчивостей приводящих к вылету частиц дисперсных материалов в межэлектродную область, образование столбиков или других макроскопических структур.

Данная работа посвящена развитию предыдущих исследований электрогидродинамических явлений на поверхности дисперсных материалов и пондеромоторным силам, приводящих к таким явлениям. Новым является изучение появления множества столбиков в случае дисперсной среды (порошка Al_2O_3), ранее никем не отмеченное в литературе. Подобное явление обнаружено также при обработке почвы. Эти явления интересны с точки зрения анализа воздействия на такие материалы как зерно, почва и микроорганизмы [4–6].

Постановка экспериментов

Используемый нами разряд представляет собой слаботочный слабосветящийся разряд (корону), возникающий вблизи проводящего

Бычков Владимир Львович, с.н.с., доцент, д.ф.-м.н.

E-mail: bychvl@gmail.com

Сороковых Дмитрий Евгеньевич, студент.

E-mail: sorokovykh.de19@physics.msu.ru

Горячкин Павел Алексеевич, аспирант.**Бычков Дмитрий Владимирович**, к.ф.-м.н.**Черников Владимир Антонович**, доцент, к.ф.-м.н.Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022

После доработки 28.11.2022

Принята к публикации 6.12.2022

 © Бычков В. Л., Сороковых Д. Е., Горячкин П. А.,
 Бычков Д. В., Черников В. А., 2023

верхнего электрода. Он происходит в воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении при напряжении 5–50 кВ между электродами на расстоянии от нескольких миллиметров до сантиметров. С увеличением напряжения корона переходит в искровой или дуговой разряд с образованием ярко светящегося канала. Разряд в воздухе сопровождается так называемым ионным, или электрическим, ветром [2, 3–5].

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

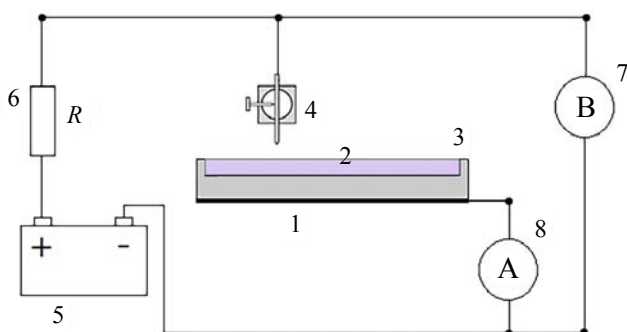


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – кювета, в которую помещается дисперсный материал 2, 3 – второй электрод (не коронирующий), 4 – коронирующий электрод, 5 – источник высокого напряжения, 6 – R – балластное сопротивление разряда для ограничения тока в цепи разряда, 7 – вольтметр для измерения падения напряжения на разряде, 8 – амперметр для измерения силы тока разряда

Установка состоит из кюветы, заполненной дисперсным материалом (глина), и электрической цепи. Верхний электрод или набор электродов диаметром 0,9 мм (радиус острия 0,2 мм) или 2 мм (радиус острия 0,4 мм) располагался на высоте 5–15 мм над поверхностью порошка. Кюветы были металлическими или диэлектрическими. Кюветы металлические имели параметры: цилиндрические – диаметром 130 мм и высотой 18–40 мм, диэлектрические были прямоугольными высотой до 45 мм, шириной до 95 мм и длиной до 140 мм.

Ток в разряде измеряли миллиамперметром А. Исследуемые жидкость или порошок помещали в кювету, отрицательные или положительные электроды располагали непосредственно над жидкостью, расстояние между электродом и жидкостью можно было изменять в диапазоне 1–30 мм. В качестве источника питания использовался генератор вы-

сокого напряжения, он позволял изменять напряжение на электродах от 2 до 50 кВ. Возникновение искры сопровождалось падением напряжения на разрядном промежутке, которое регистрировалось вольтметром. Использовалось балластное сопротивление для ограничения тока номиналом 60–100 МОм. Типичные значения силы тока составляли 10–800 мкА.

Результаты экспериментов

С целью выяснения природы появления структур под действием коронного разряда в воздухе были проделаны опыты по воздействию коронного разряда на поверхность порошка из Al_2O_3 (глины).

Когда такой порошок был покрыт алюминиевой пудрой был получен столбик под иглой существующий без разряда несколько минут. Мы проделали эксперименты с применением много электродного коронного разряда над порошком из глины. Типичные размеры частиц порошка составляли 2–20 мкм. Если между заземленным электродом и порошком находился слой диэлектрика толщиной 3 мм, то никакие из рассматриваемых явлений не наблюдались.

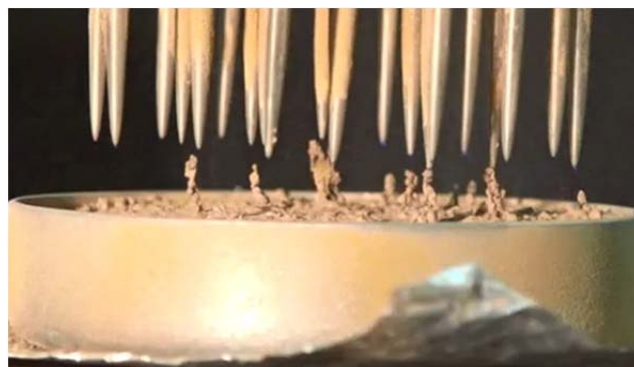


Рис. 2. Появление столбиков над глиняным порошком под воздействием отрицательного коронного разряда. Напряжение 10 кВ, ток 230 мкА

Эксперименты показали, что под воздействием отрицательной короны (с 19 иглами) напряжением 5–10 кВ и током 230 мкА на порошок толщиной 10 мм под иглами, удалёнными на расстояние 5–10 мм от поверхности порошка, появлялись столбики (рис. 2). Сначала, некоторое время после включения разряда (1–2 кадра видеокмеры) ничего заметного

не происходило. Затем наблюдалось образование облака из мелких частиц глины. Образование такого облака связано с ионным ветром, который действует на частицы коронного разряда. В этом случае давление ионного ветра достигает величины 40 Н/м^2 [3, 5]. При осаждении облачных частиц на поверхность порошка появлялись столбики высотой от 1 до 7 мм, в количестве до 8 и более штук, иногда конические, состоящие из частиц глины (рис. 2). Они были достаточно устойчивы и существовали, не разрушаясь более 60 с. Подобные структуры (столбики) появляются и при воздействии разряда на поверхность чернотема.



Рис. 3. Появление длинных неустойчивых столбиков над глиняным порошком под воздействием отрицательного коронного разряда. Напряжение 16 кВ

В другом опыте с использованием той же системы электродов, при расстоянии между поверхностью глины и иглами 15 мм и толщиной слоя порошка 5 мм, расположенного на заземленном плоском электроде, при достижении напряжения 10 кВ происходил вылет частиц глины (процесс аналогичен явлениям, рассмотренным в случае с жидкими электродами [3]). При дальнейшем увеличении напряжения на разрядном промежутке наблюдался более активный вылет крупных частиц (диаметром $\sim 0,5 \text{ мм}$), образование длинных неустойчивых цепочек (рис. 3), которые появлялись, росли и разрушались за время порядка секунды, «звенья» удерживаются, предположительно, из-за коагуляции и поляризации частиц глины. Отметим, что структуры образовывались только в случае наличия в межэлектродной области частичек материала, постоянно вылетающего с поверхности. При дальнейшем увеличении напряже-

ния до 17 кВ выдувание частиц в область разряда значительно увеличивалось. Под иглами образовывались устойчивые структуры конической формы, которые сохранялись и после выключения напряжения на электродах.

Обсуждение полученных результатов

Как известно [14, 15] электрическое поле влияет на поведение заряженной поверхности, оно притягивает поверхность против сил тяжести и сил прилипания, при этом движение возмущенной поверхности в однородном электрическом поле вызывает развитие электростатических неустойчивостей.

Используя тот факт, что электрическое поле нашего разряда близко к полю коронного разряда в центре кюветы воспользуемся результатами [8] для дальнейших оценок. Электрическое поле E_{max} на расстоянии x от острия при расстоянии d между концом иглы параболической формы с радиусом кривизны r и перпендикулярной плоскостью связано с напряжением V на электродах, и выражается как:

$$E_{\text{max}} = \frac{2V}{(2x+r)\ln(2d/r+1)}. \quad (1)$$

Этой формулой можно описать электрическое поле в разряде, когда нет развитого плазменного канала между иглой и поверхностью. Поэтому можно прибегнуть к объяснению полученных результатов при помощи рассмотрения возникающей пондермоторной силы. Как известно [14], на образец диэлектрика, помещенный в неоднородное электрическое поле, действует пондермоторная сила, объемная плотность которой описывается формулой

$$f = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 - \varepsilon_0}{2} \text{grad } E^2 \quad (2)$$

где ε_1 , ε_0 – соответственно диэлектрическая проницаемость диэлектрического образца и воздуха соответственно. Из формулы (2) видно, что направление силы, действующей на диэлектрик, не зависит от направления поля, она всегда направлена на максимальное увеличение напряженности электрического поля.

Оценим значение этой силы для частиц глины в воздухе. Величина градиента квадрата электрического поля от иглы коронного разряда, рассчитанная из (1), вдоль направления x , совпадающего с направлением иглы, равна:

$$\frac{\partial}{\partial x} E_{\max}^2 = -\frac{16V^2}{(2x+r)^3 \ln^2(2d/r+1)} \quad (3)$$

$$f = -\frac{8\varepsilon_0(\varepsilon_1-1)V^2}{(2x+r)^3 \ln^2(2d/r+1)}. \quad (4)$$

В соответствии с данными эксперимента имеем: $x = 5$ мм, $r = 0,4$ мм радиус кривизны кончика иглы, $d = 20$ мм, $V = 20$ кВ, для глины $\varepsilon_0 = 10$. Тогда из уравнений (1) и (2), мы получим плотность силы (3) для частиц глины $1,06 \times 10^4$ Н/м³. Это означает, что такая сила может уравновесить глину с плотностью 1060 кг/м³ (при плотности глины ~ 2200 кг/м³).

Таким образом, в случае порошка Al_2O_3 пондермоторная сила вносит существенный вклад в образование столбиков, но для точной оценки требуется учесть заряд, образующийся на поверхности столбиков, возможно играет роль вода, которая может адсорбироваться частицами глины, тем самым увеличивая диэлектрическую проницаемость частиц, что приводит к увеличению пондермоторной силы.

Заключение

Исследовано воздействие разряда над поверхностью порошка из Al_2O_3 . Показано, что электрогидродинамические структуры в виде столбиков появляются при воздействии пондермоторной силы, возникающей в неоднородном поле разряда при наличии мелких компонентов порошка в воздухе. Резуль-

таты экспериментов показывают, что коронным разрядом в порошок электрическая энергия вводится неравномерно, и приводит к нагреву или охлаждению материала. Этот эффект надо учитывать в приложении данного разряда к воздействию на почву, зерно и зеленые растения [5–7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Тематический том 9-5: Прикладная химия плазмы / под ред. Фортова В. Е. – М.: «Янус-К», 2008.
2. *Остроумов Г. А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. – М.: Наука, 1979.
3. *Александров А. Ф., Бычков В. Л., Бычков Д. В. и др.* / Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 67.
4. *Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47. P. 623–626.
5. *Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Esakov I. I., Vysikaylo P. I.* / IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. V. 49. № 3. P. 1028–1033.
6. *Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A. P.* / IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48. № 2. P. 350–354.
7. *Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A., Dudarev D. P.* / IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. V. 49. № 3. P. 1034–1040.
8. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.
9. *Козлов Б. А., Соловьев В. И.* / Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 7. С. 70–76.
10. *Eichwald O., Guntoro N. A., Yousfi M., Benhenni M.* / Journal of Physics D: Applied Physics. 2002. V. 35. P. 439.
11. *Lacoste D. A., Pai D. Z., Laux C. O.* / Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibition. – Reno, Nevada, USA, 2004.
12. *Семенов В. К.* / Вестник ИГЭУ. 2013. № 5. С. 69.
13. *Семенов В. К.* / Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 105.
14. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматгиз, 1959.
15. *Матвеев А. Н.* Электродинамика. – М.: Высш. школа, 1980.

Electrohydrodynamic phenomena in discharges over liquid and dispersed electrodes

V. L. Bychkov, D. E. Sorokovykh, P. A. Goryachkin, D. V. Bychkov and V. A. Chernikov

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics,
M. V. Lomonosov Moscow State University
Bd. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
E-mail: bychvl@gmail.com

Received 16.11.2022; revised 28.11.2022; accepted 6.12.2022

The paper presents data on experiments with discharges over dielectrics in the form of powder from Al_2O_3 , SiO_2 , soil, etc. Discharges developed under the upper electrode in the form of a needle, or a set of needles. A cuvette filled with a substance was used as the lower electrode, to which grounding was applied. The appearance of jets and their destruction into droplets reflect the development of hydrodynamic phenomena over charged liquids. In the case of a dispersed electrode (electrodes), a funnel (funnels) appears on the surface, or complex pointed structures, more complex shapes, etc. under the action of hydrodynamic flows. With the help of a thermal imager, measurements of the surface temperature of the liquid were carried out. A qualitative interpretation of the results is given.

Keywords: corona discharge, liquid and dispersed electrodes, water, alcohol, electrohydrodynamic phenomena, ion wind, columns, trickles.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-22-26

REFERENCES

1. Ed. Lebedev Yu. A., Plate N. A. and Fortov V. E. "Encyclopedia of low temperature plasma. Applied Plasma Chemistry." V. 9-5, Moscow, Yahys-K, 2008.
2. Ostroumov G. A., Interaction of electric and hydrodynamic fields, Moscow, Nauka, 1979.
3. Alexandrov A. F., Bychkov V. L., Bychkov D. V., Volkov S. A., Kostyuk A. A. and Chernikov V. A., Moscow University Physics Bulletin. **66**, 67 (2011).
4. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vetchinin S. P., Plasma Phys Rep. **47**, 623 (2021).
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Esakov I. I. and Vysikaylo P. I., IEEE Trans. Plasma Sci. **49**, 1028 (2021).
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., Mikhailovskaya T. O. and Shvarov A. P., IEEE Trans. Plasma Sci. **48**, 350 (2020).
7. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P., IEEE Trans. Plasma Sci. **49**, 1034 (2021).
8. Raizer Y. P., Gas Discharge Physics, New York, Springer, 1991.
9. Kozlov B. A. and Solov'ev V. I., Zhur. Tekhnich. Fiziki **77** (7), 70, 2007.
10. Eichwald O., Guntoro N. A., Yousfi M. and Benheni M., J. Phys. D. Appl. Phys. **35**, 439 (2002).
11. Lacoste D. A., Pai D. Z. and Laux C. O., 42-nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 5–8 January, USA, Reno, Nevada, 2004.
12. Semenov V. K., Ivanovsky state power university Bulletin, № 5, 69, (2013).
13. Semenov V. K., Ivanovsky state power university Bulletin, № 6, 105 (2013).
14. Landau L. D. and Lifshitz E. M., Electrodynamics of continuous media, Moscow, Nauka, 1982.
15. Matveev A. N., Electrodynamics, Moscow, High School, 1980.