

УДК 537.52
EDN: RKAXVE

PACS: 52.80.-s, 81.20.Rg

Формирование распыла жидкости в присутствии барьерного разряда

А. С. Савельев, А. В. Угрюмов

Выполнено измерение характеристик распыла воды при иницировании диэлектрического барьерного разряда в области пространства, где происходит распад на капли пленки жидкости, истекающей из отверстия форсунки. Разряд иницировался в области пространства между пленкой воды и высоковольтным электродом, окруженным диэлектрическим материалом. Измерения проводились прямым теневым методом, основанным на получении множества теневых мгновенных микрофотографий капель. Регистрировались осциллограммы тока и напряжения в цепи создания барьерного разряда. Сравнивались средние параметры, такие как средние диаметр и диаметр по Заутеру, капель в двух случаях: без иницирования разряда и при его создании в области пространства, где формируется распыл, при частоте напряжения 5 кГц и его амплитуде 10 кВ. Показано, что в случае с разрядом средние параметры капель значительно уменьшаются, а их количество увеличивается.

Ключевые слова: барьерный разряд, аэрозоль.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-33-39

Введение

Использование электрического разряда считается перспективным методом очистки воды [1, 2]. Исследователи ищут альтернативные существующим способы очистки, например, с использованием перекиси водорода, получаемой с помощью электрического разряда [1, 2]. Развиваются методы т.н. активации плазмой воды [1]. Вода в том или ином виде (жидкая, диспергированная, пар) подвергается воздействию плазмы, создаваемой различными разрядами [1, 3], из-за чего в ее составе

возникают активные компоненты, способствующие очистке, обеззараживанию, обесцвечиванию. Рассматриваются коротко- и долгоживущие соединения на основе кислорода и азота: перекись водорода, нитриты, нитраты и т. д. Активированная вода может быть использована для сельскохозяйственных нужд [4], для обеззараживания поверхностей листьев и плодов, а также для удобрения почвы соединениями азота [5–9]. При использовании раствора препарата в воде и при его распылении на растения в присутствии высокого напряжения капли приобретают электрический заряд, что способствует равномерному покрытию поверхности [10, 11].

Электрический разряд, как правило, существует в газовой среде, поэтому для осуществления активации воды необходимо наличие поверхности раздела вода–воздух (вода–газ). Использование воды в диспергированном виде имеет преимущество, заключающееся в значительно большем значении величины относительной площади поверхности, равной отношению суммарной площади поверхности жидкости к ее массе. Использо-

Савельев Андрей Сергеевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: fisteh@mail.ru

Угрюмов Александр Валерьевич², старший вице-президент по научно-технической деятельности, к.т.н.¹ Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² АО «ТВЭЛ».

Россия, 115409, Москва, ул. Каширское шоссе, 49.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024

После доработки 5.09.2024

Принята к публикации 13.09.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Савельев А. С., Угрюмов А. В., 2024

ние воды в виде капель или пузырьковой жидкости позволяет не только более эффективно генерировать активные компоненты (перекись водорода), но также и эффективно сохранять наработанные соединения [2]. Перекись водорода разлагается под действием плазмы, но близость поверхности воды к зоне реакции обеспечивает быстрое растворение и сохранение активного соединения в объеме жидкости [2].

Включение высокого напряжения для инициирования разряда и создание области энерговыделения может приводить к перераспределению массы воды в пространстве. Показано [12], что формирование каналов искровых разрядов в воде приводит к возникновению акустических волн, которые способствуют возникновению пузырей и интенсификации перемешивания. В [13] показано, что наличие высокого напряжения, искровых разрядов и тлеющего разряда атмосферного давления приводит к воздействию на усредненные параметры распыла воды за счет ускорения капель, их частичного испарения. Эти процессы влияют на развитие самого разряда [13]. Высокое напряжение вызывает образование аэрозолей жидкостей [14–16], т. н. электроспреев, при определенных условиях. Данный процесс характеризуется высокой степенью т. н. "атомизации" жидкости при относительно малом массовом ее расходе [16]. Данный процесс нашел применение в двигателях сверхмалой тяги для космических аппаратов, масс-спектрометрии высокомолекулярных органических соединений, сельском хозяйстве. Взаимодействие плазмы разряда с водой в различных фазовых состояниях представляет комплексную междисциплинарную область науки, включающую физику плазмы, механику жидкости и газа, тепло- и массообмен, фотолиз, многофазную химию и физику аэрозолей [18].

В работе исследуется процесс формирования распыла воды слабой проводимости в присутствии высокого напряжения и плазмы барьерного разряда. Целью является измерение усредненных параметров распыла жидкости и распределения их в пространстве при наличии разряда и без него. Используемые в работе схема инициирования разряда и способ

распыления жидкости дают возможность влиять на процесс формирования распыла, заключающуюся в воздействии на первичное течение жидкости периодическим электрическим полем заданной частоты.

Описание эксперимента

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки. Отфильтрованная техническая вода 1 проводимостью около 0,3 мСм/см подается под давлением через трубку из непроводящего материала на форсунку 2 центробежного типа, помещенную в заземленный металлический корпус. Вода омывает корпус изнутри, затем вытекает из форсунки, формируя в пространстве под ней сложное течение жидкости и газа. Его можно описать как течение пленки жидкости 4 и движение капель 5, образовавшихся вследствие ее распада, в атмосфере воздуха [16]. Контроль давления воды проводился с помощью манометра 3. В экспериментах давление воды было постоянно (2,5 бар), при этом ее расход был 0,95 г/с.

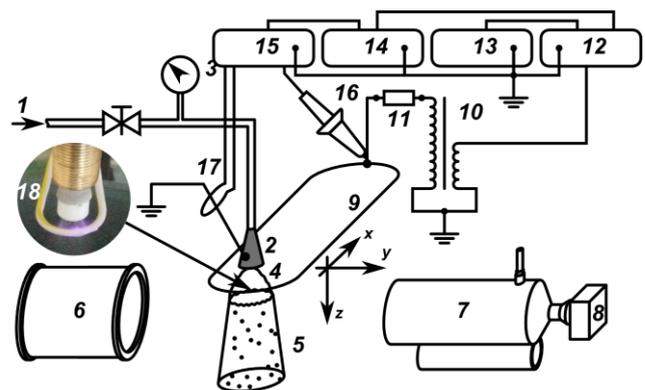


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – подача воды, 2 – форсунка, 3 – манометр, 4 – пленка воды, 5 – капли распыла, 6 – устройство фоновой подсветки, 7 – микроскоп с большим рабочим расстоянием, 8 – цифровая видеокамера, 9 – высоковольтный электрод, 10 – повышающий трансформатор, 11 – балластный резистор, 12 – усилитель мощности, 13 – лабораторный блок питания, 14 – генератор сигналов, 15 – цифровой осциллограф, 16 – высоковольтный пробник, 17 – токовый датчик, 18 – место горения разряда

Для визуализации течения воды и измерения размера капель использовался прямой теневой метод [19, 20]. Преимуществом мето-

да является локальный характер измерений. Использовались микроскоп 7, цифровая видеокамера 8 (разрешение 1280×720 пикс.) и устройство подсветки 6 на основе сверхъяркого светодиода. Длительность его свечения составляла величину 0,4 мкс. Микроскоп с видеокамерой и подсветкой жестко закреплены друг относительно друга на трехосевом линейном трансляторе, способном перемещать всю оптическую систему относительно неподвижной форсунки вдоль осей x , y , z (см. рис. 1) в диапазоне $[-50:50]$ мм, $[-50:50]$ мм, $[-200:200]$ мм с точностью 0,005 мм, 0,005 мм, 0,05 мм соответственно. Выполнялась съемка микрофотографий при фиксированном положении оптической системы относительно форсунки со скоростью 120 к/с и при экспозиции 0,4 мкс в количестве 10^4 кадров. Съемка повторялась при изменении положения системы вдоль оси x с шагом 1 мм, т. е. проводилось измерение распределения усредненных характеристик распыла на отрезке на оси x . Цифровые микрофотографии сохранялись на жесткий диск, а затем каждая подвергалась программной обработке. Обработка выполнялась согласно алгоритму, описанному в [20], а результатом его работы был список зарегистрированных на всех фотографиях капель и их свойств: координаты положения в кадре, диаметр.

Для зажигания барьерного разряда в области распыла использовалась электрическая схема, показанная на рисунке 1. Высоковольтный электрод 9 овальной формы размещался неподвижно относительно форсунки таким образом, чтобы барьерный разряд возникал вблизи нижнего края пленки воды 4. Электрод представляет собой медную проволоку диаметром 1 мм, окруженную диэлектрическим материалом (фторопласт). Высоковольтный электрод располагался на таком расстоянии от пленки, что при амплитуде подаваемого на него напряжения $U_0 = 10$ кВ барьерный разряд горел стабильно. При этом минимальное расстояние между поверхностью диэлектрика и пленкой составляло величину 3 мм и не менялось. При возникновении разряда электрический ток протекает по плазме в воздушном зазоре между высоковольтным электродом и пленкой воды, а также по самой пленке. На рисунке 1 показана фотография (18) барьерного разряда.

Высоковольтный электрод подключался к трансформатору 10 через резистор 11 сопротивлением 20 кОм. Первичная обмотка трансформатора подключалась к усилителю мощности 12, запитанному от лабораторного блока питания 13. На вход усилителя подавался синусоидальный сигнал с генератора 14. Подстройкой частоты и амплитуды сигнала генератора проводилась установка максимальной амплитуды напряжения на электроде 9, эта величина составляла значение $U_0 = 10$ кВ, при этом в области 18 между электродом и пленкой жидкости зажигался барьерный разряд. Измерение напряжения проводилось с помощью осциллографа 15 и пробника 16, а ток разряда измерялся датчиком тока 17.

Результаты и обсуждение

Измерения показали, что пленка жидкости претерпевает распад на расстоянии $z = 5$ мм от форсунки, а на расстоянии $z = 30$ мм капли не имеют деформации, т. е. не претерпевают вторичного деления. Если фоновую подсветку зажигать дважды с некоторой задержкой Δt во время экспонирования кадра, то на нем будут видны два положения капли, и представляется возможным измерить скорость ее движения. В области распада пленки (край водяной пленки, 4 на рис. 1) на капли они имеют скорость, направленную вертикально вниз. Это позволяет утверждать, что разряд влияет на параметры распыла именно в том месте, где первый существует, т. е. на оси x , где $x < 0$ (см. рис. 1).

На рисунке 2а представлены в качестве примера осциллограммы тока и напряжения, измеренные с помощью токового датчика и делителя напряжения с полосами пропускания 60 МГц и 100 МГц соответственно. При указанной выше конфигурации электродов и высоковольтной схеме зарегистрированы импульсы тока с максимальной амплитудой 15 мА. Относительно небольшой ток разряда связан с ограничением его не только с помощью балластного резистора, но также и из-за собственного сопротивления пленки воды, обладающей относительно низкой проводимостью.

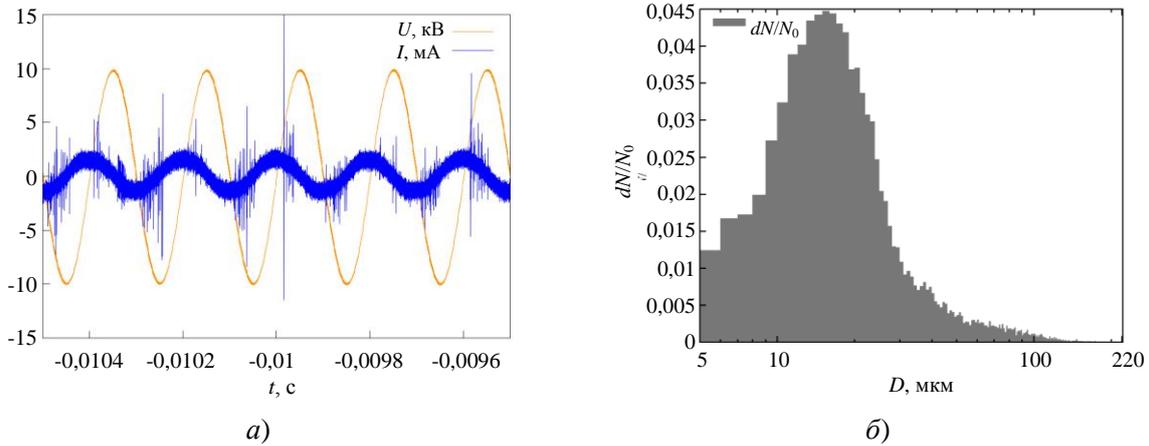


Рис. 2. Примеры получаемых в эксперименте осциллограмм тока и напряжения (а) и гистограммы распределения количества капель по диаметру (б)

На рисунке 2б представлен пример получаемой гистограммы распределения относительного количества капель распыла по диаметру D . Обработка полученных данных о каплях может дать значения следующих величин [16]:

$$D_{pq} = \left(\frac{\sum_i^{N_0} D_i^p}{\sum_i^{N_0} D_i^q} \right)^{\frac{1}{p-q}}, \quad \bar{D}_{pq} = \left(\frac{\int_{x_1}^{x_2} D_{p0}^p dx}{\int_{x_1}^{x_2} D_{q0}^q dx} \right)^{\frac{1}{p-q}},$$

где N_0 – количество зарегистрированных капель, D_i – диаметр i -й зарегистрированной капли, x_1 и x_2 – координаты начала и конца измерения свойств распыла вдоль оси x . Эти величины можно назвать усредненными характеристиками (параметрами) распыла жидкости. Характеристики позволяют проводить количественное сравнение процессов, таких как испарение, горение и т. п. [16]. Т. к. в эксперименте эти величины получены для различных положений оптической системы относительно форсунки, можно говорить о распределениях характеристик распыла по пространству (оси x). При интегрировании параметров вдоль оси можно получить представление о параметрах распыла в целом. Эти величины являются удобными при количественном сравнении аэрозолей, полученных при различных условиях.

На рисунке 3 представлены зависимости усредненных характеристик распыла от координаты оси x ($y = 0$ мм, $z = 30$ мм). Видно, что в центре распыла (на оси форсунки) значительно уменьшаются параметры N_0 , D_{10} , D_{32} , но на периферии факела распыла наблюдается

обратный эффект – увеличение этих параметров. На первый взгляд это может быть связано с тем, что из-за наличия высокого напряжения в области разряда капли большего диаметра под действием электрической силы выбрасываются на периферию, а капли малого диаметра остаются в центре. Если предположить, что барьерный разряд и высокое напряжение влияют только на перераспределение капель в пространстве, то интегральные величины параметров распыла должны сохраняться после включения разряда. Эксперимент показывает обратное. В таблице представлены данные об усредненных параметрах распыла в случае с разрядом ($U_0 = 10$ кВ) и без него ($U_0 = 0$ кВ). Включение разряда приводит к уменьшению диаметров D_{10} и D_{32} , при этом количество капель распыла N_0 увеличивается.

Электрическое поле оказывает дестабилизирующее действие на пленку жидкости и капли большого диаметра, вызывая их дополнительный распад и деление на более мелкие капли. В работе [21] приведены данные о влиянии механической вибрации форсунки (с частотой несколько кГц) на некоторые параметры распыла жидкости. Показано, что увеличение частоты колебаний форсунки приводит к ускорению распада пленки жидкости и к уменьшению среднего диаметра (D_{10}). При различных давлениях воды диаметр D_{10} капель распыла практически монотонно уменьшается с увеличением частоты вибрации. Этот эффект более выражен при минимальном давлении воды (около 2 бар), когда средний диаметр распыла уменьшается с 80 мкм до 54 мкм при частоте вибраций 4 кГц.

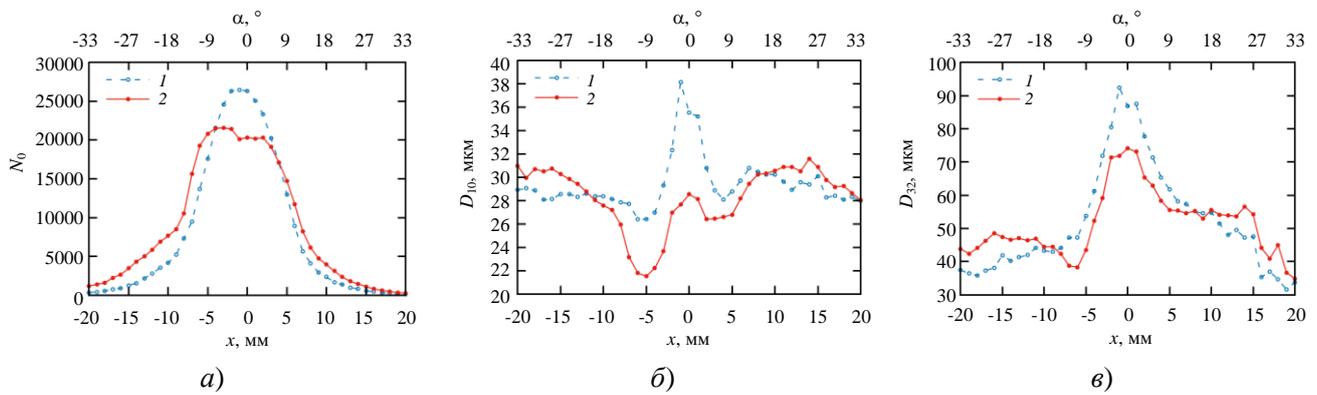


Рис. 3. Зависимости некоторых средних характеристик распыла воды от координаты x и угла α относительно геометрической оси форсунки в случаях без (1) и с разрядом (2)

Таблица

Усредненные по пространству параметры распыла в случаях без ($U_0 = 0$ кВ) и с разрядом ($U_0 = 10$ кВ)

U_0 , кВ	\bar{N}_0	\bar{D}_{10}	\bar{D}_{20}	\bar{D}_{30}	\bar{D}_{32}
0	326084	30,71	38,42	47,68	73,45
10	360100	26,42	31,87	39,00	58,39

При воздействии на пленку воды вблизи выходного отверстия форсунки электрическим полем следует ожидать подобного эффекта. Средний диаметр каплей D_{10} распыла в целом уменьшается более чем на 10 % при инициировании барьерного разряда вблизи края пленки. Средний диаметр по Заутеру D_{32} уменьшается почти на 20 % (см. таблицу). Т. к. объем проходящей воды зависит только от ее избыточного давления, которое постоянно, следует ожидать увеличения количества каплей распыла. При включении разряда количество каплей возрастает примерно на 10 %.

На графиках рисунка 3 можно видеть особенность, связанную с резким падением характеристик распыла в месте пространства, соответствующем месту существования разряда. Так, для зависимости величины $D_{10}(x)$ в точке с координатой $x = -5$ мм наблюдается минимальное ее значение. Наличие максимальной амплитуды электрического поля в этой части пространства вызывает и наибольшие возмущения пленки воды, и также зажигание барьерного разряда. Напротив, в той части пространства, где $x > 0$, геометрическая конфигурация высоковольтного электрода такова, что электрическое поле значительно меньше, чем в области существования разряда, т. к. расстояние от пленки воды до этого

электрода значительно больше (см. рис. 1). Но значения средних характеристик распыла также оказываются меньше при $x > 0$ в сравнении со случаем без разряда. Пространственное распределение этих характеристик теряет свою симметрию при включении разряда, и связано это с несимметричной конфигурацией электрического поля.

Выводы

Предложен способ инициирования барьерного разряда в области пространства, где происходит формирование распыла воды – распад пленки воды на капли. Проведено измерение пространственного распределения усредненных характеристик стационарного во времени распыла жидкости в двух случаях: с инициированием барьерного разряда и без него. Полученные в эксперименте данные свидетельствуют о том, что инициирование барьерного разряда в области формирования распыла воды приводит к существенному изменению характеристик последнего. Наличие высокого переменного напряжения амплитудой 10 кВ и частотой 5 кГц приводит к уменьшению на 20 % количества каплей, измеренного за продолжительное время, на оси выходного отверстия форсунки при прочих

равных условиях. При этом во всей области пространства, занятой распылом, количество капель увеличивается на 10 % после включения разряда. Средний диаметр D_{10} и диаметр по Заутеру D_{32} после зажигания разряда значительно уменьшаются в центральной области распыла, но несколько увеличиваются на периферии. Эти изменения не могут быть объяснены только отклонением траектории движения крупных капель, поскольку величины D_{10} и D_{32} , усредненные по диаметру области распыла, также уменьшаются после инициирования разряда – на 13 % и 20 % соответственно. Наличие высокого переменного напряжения разряда вблизи пленки жидкости у выходного отверстия форсунки может приводить к усилению неустойчивости этой пленки, ускоряющей интенсификацию ее распада на капли. Экспериментальные данные могут быть применены при проектировании устройств (плазменных реакторов), в которых реализуются плазмохимические превращения жидкости, диспергированной в капельный поток в газе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30062) и средств индустриального партнера АО "ТВЭЛ" (департамент по научно-технической деятельности неядерных производств).

ЛИТЕРАТУРА

1. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., Xue Q. / Chem. Eng. J. 2014. Vol. 236. P. 348–368.
2. Thagard S. M., Locke B. R. Electrical discharge plasma for water treatment / Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Ed. by Stefan M.I. — London: IWA Publishing. 2018. Chapter 12. P. 493–533.
3. Locke B. R., Shih K.-Y. / Plasma Sources Sci. Technol. 2011. Vol. 20. P. 034006.
4. Pipliya S., Kumar S., Babar N., Srivastav P. P. / Food Chemistry Advances. 2023. Vol. 2. P. 100249.
5. Ingels R., Graves D. B. / Plasma Medicine. 2015. Vol. 5. Is. 2–4. P. 257–270.
6. Matra K., Tanakaran Y., Luang-In V., Theepharaksapan S. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. Vol. 50. P. 1430–1439.
7. Theepharaksapan S., Matra K., Thana P., Traiporn T., Aryuwong W., Tanakaran Y., Lerkmahalikhit Y., Malun L., Ittisupornrat S. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2024. P. 1–11.
8. Наумова И. К., Субботкина И. Н., Тумов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40–46.
9. Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Софрокин Д. А., Сурнина Е. Н., Нужных С. А. / Прикладная физика. 2024. № 2. С. 43–50.
10. Law S. E. / J. Electrostat. 2001. Vol. 51–52. P. 25–42.
11. Maynagh B. M., Ghobadian B., Jahannama M. R., Hashjin T. T. / J. Agric. Sci. Technol. 2009. Vol. 11. P. 249–257.
12. Гудкова В. В., Разволяева Д. А., Моряков И. В., Антилов А. М. / Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1160–1169.
13. Савельев А. С. / Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1237–1246.
14. Zeleny J. / Phys. Rev. 1914. Vol. 3. P. 69–91.
15. Drozin V. G. / J. Colloid Sci. 1955. Vol. 10. Is. 2. P. 158–164.
16. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and sprays: Second edition. — Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
17. Maski D., Durairaj D. / J. Electrostat. 2010. Vol. 68. Is. 2. P. 152–158.
18. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., Graham W. G., Graves D. B., Hofman-Caris R. C. H. M., Maric D., Reid J. P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J. E., Garrick S. C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krca F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E. C., Pawlat J., Lj Petrovic Z., Pflieger R., Reuter S., Schram D. C., Schroter S., Shiraiwa M., Tarabova B., Tsai P. A., Verlet J. R. R., von Woedtke T., Wilson K. R., Yasui K., Zvereva G. / Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 053002.
19. De Cock N., Massinon M., Lebeau F. Agricultural spray measurement by high-speed shadow imagery / Proc. of the International Advances in Pesticide Application. — Oxford, United Kingdom, 2014. P. 1–10.
20. Савельев А. С. / Вестник Объединенного института высоких температур. 2019. Т. 2. С. 69–74.
21. Crapper G. D., Dombrowski N. / Int. J. Multiphase Flow. 1984. Vol. 10. Is. 6. P. 731–736.

PACS: 52.80.-s, 81.20.Rg

Formation of liquid spray in the presence of barrier discharge

A. S. Saveliev¹ and A. V. Ugryumov²

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

² TVEL JSC

49 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 15.08.2024; revised 5.09.2024; accepted 13.09.2024

The characteristics of water spray were measured in presence of dielectric barrier discharge in the region where the film of liquid flowing out of the nozzle hole disintegrates into droplets. The discharge was initiated in the region between the water film and the high-voltage electrode surrounded by a dielectric material. The measurements were performed using the direct shadow method based on obtaining multiple shadow instantaneous microphotographs of droplets. Oscillograms of current and voltage in the barrier discharge initiation circuit were recorded. The average parameters, such as the average diameter and Sauter mean diameter, of droplets were compared in two cases: without discharge initiation and when it was created in the region where the spray is formed, at a voltage frequency of 5 kHz and its amplitude of 10 kV. It was shown that in the case of discharge initiation the average parameters of droplets significantly decrease and their number increases.

Keywords: barrier discharge, aerosol.

REFERENCES

1. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z. and Xue Q., Chem. Eng. J. **236**, P. 348–368 (2014).
2. Thagard S. M. and Locke B. R. Electrical discharge plasma for water treatment / Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Ed. by Stefan M.I., London: IWA Publishing, 2018, Chapter 12, P. 493–533.
3. Locke B. R. and Shih K.-Y., Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 034006 (2011).
4. Pipliya S., Kumar S., Babar N. and Srivastav P. P., Food Chemistry Advances **2**, 100249 (2023).
5. Ingels R. and Graves D. B., Plasma Medicine **5** (2–4), 257–270 (2015).
6. Matra K., Tanakaran Y., Luang-In V. and Theepharaksapan S., IEEE Trans. Plasma Sci. **50**, 1430–1439 (2022).
7. Theepharaksapan S., Matra K., Thana P., Traiporm T., Aryuwong W., Tanakaran Y., Lerkmahalikhit Y., Malun L. and Ittisupornrat S., IEEE Trans. Plasma Sci., 1–11 (2024).
8. Naumova I. K., Subbotkina I. N., Titov V. A., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., Applied Physics, № 4, 40–46 (2021) [in Russian].
9. Sosnin E. A., Panarin V. A., Skakun V. S., Sorokin D. A., Surnina E. N. and Nuznich S. A., Applied physics, № 2, 43–50 (2024) [in Russian].
10. Law S. E., J. Electrostat. **51–52**, 25–42 (2001).
11. Maynagh B. M., Ghobadian B., Jahannama M. R. and Hashjin T. T., J. Agric. Sci. Technol. **11**, 249–257 (2009).
12. Gudkova V. V., Razvolyaeva D. A., Moryakov I. V. and Anpilov A. M., Plasma Phys. Rep. **49**, 1341–1349 (2023).
13. Saveliev A. S., Plasma Phys. Rep. **49**, 1414–1423 (2023).
14. Zeleny J., Phys. Rev. **3**, 69–91 (1914).
15. Drozin V. G., J. Colloid Sci. **10** (2), 158–164 (1955).
16. Lefebvre A. H. and McDonell V. G. Atomization and sprays: Second edition, Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
17. Maski D. and Durairaj D., J. Electrostat. **68** (2), 152–158 (2010).
18. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., Graham W. G., Graves D. B., Hofman-Caris R. C. H. M., Maric D., Reid J. P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J. E., Garrick S. C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krcma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E. C., Pawlat J., Lj Petrovic Z., Pflieger R., Reuter S., Schram D. C., Schroter S., Shiraiwa M., Tarabova B., Tsai P. A., Verlet J. R. R., von Woedtkte T., Wilson K. R., Yasui K. and Zvereva G., Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 053002 (2016).
19. De Cock N., Massinon M. and Lebeau F. Agricultural spray measurement by high-speed shadow imagery / Proc. of the International Advances in Pesticide Application, Oxford, United Kingdom, 2014, P. 1–10.
20. Saveliev A. S., Vestnik Obedinennogo Instituta Vysokih Temperatur **2**, 69 (2019) [in Russian].
21. Crapper G. D. and Dombrowski N., Int. J. Multiphase Flow **10** (6), 731–736 (1984).