

УДК 537.52
EDN: WSRQTB

PACS: 52.80.Wq

**Воздействие разряда на распыл воды вихревой форсункой
при различном ее давлении**

© А. С. Савельев*, В. А. Панов, Ю. М. Куликов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

*E-mail: fisteh@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.04.2026; после доработки 28.05.2026; принята к публикации 22.10.2026
Шифр научной специальности: 2.2.3.

Экспериментально исследовано влияние импульсно-периодического искрового разряда, инициируемого вблизи пленки жидкости у выходного отверстия вихревой форсунки, на пространственное распыление воды. Разряд зажигался между заостренным высоковольтным электродом (положительная полярность, 14 кВ) и поверхностью пленки. Измерения проведены в диапазоне частот следования разрядов 0,1–40 кГц при избыточных давлениях воды от 0,5 до 4 бар. По данным скоростной теневой визуализации количественно определена ширина конуса распыла и введен параметр H/H_0 , характеризующий относительное увеличение ширины (угла) пространственного распыления при включении разряда. Показано, что зависимость H/H_0 от частоты носит немонотонный характер с выраженным максимумом, положение которого смещается в область более высоких частот с ростом давления воды, тогда как абсолютная величина максимума снижается. Наибольшее значение $H/H_0 \approx 5$ – при давлении 0,5–1 атм. Обнаруженный эффект объясняется генерацией волны сжатия в канале разряда, сообщающей каплям дополнительный радиальный импульс и вызывающей раннее разрушение пленки. Обсуждается энергетическая эффективность метода при различных давлениях воды.

Ключевые слова: аэрозоль, искровой разряд, форсунка.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-45-52

Введение

Распыление жидкости представляет собой процесс, в котором разрушающее действие сил инерции и внешних аэродинамических сил противостоит влиянию вязкости жидкости и силе поверхностного натяжения [1, 2]. Теоретический и экспериментальный анализ механизма распыления проводился в работах [3, 4], а сложность данного явления связана с влиянием различных параметров на начальный распад струи: условия течения внутри инжектора, характеристики турбулентности, взаимодействие жидкости с окружающей средой, развитие волн вдоль поверх-

ности жидкости, а также двухфазная природа течения [5, 6].

Распылительные устройства играют значительную роль в современной технике [3, 4] и используются повсеместно: для распыления топлива в двигателях внутреннего сгорания [7], для получения порошков и сплавов путем распыления расплавов металлов [8], при распылительном пиролизе, сушке и сублимационной сушке [9–11], в системах пожаротушения [12], в сельском хозяйстве [13], в системах капельного охлаждения [14], при нанесении лакокрасочных покрытий [15] и др. Для этого используются различные типы форсуночных устройств: гидравлические, центробежные,

пневматические, ультразвуковые, электростатические и др. [16]. Повысить эффективность работы в ряде случаев удастся с помощью комбинации нескольких факторов воздействия на поток [17].

Анализ показывает, что интенсификация образования капель происходит при повышении рабочего давления жидкости, уменьшении диаметра выходного отверстия, повышении степени закрутки потока, уменьшении вязкости и коэффициента поверхностного натяжения. Ранее авторами был предложен метод электрического воздействия на факел с помощью инициирования барьерного разряда между пленкой жидкости, возникающей вблизи выходного отверстия вихревой форсунки и кольцевым электродом, покрытым диэлектриком, что позволило увеличить общее число капель в единицу времени на 10 % и заметно уменьшить их диаметр D32 в центральной области распыла при сохранении расхода жидкости [18]. Однако данный метод практически не влиял на форму факела форсунки. В других работах авторов исследовалось влияние искровых разрядов на динамику распада пленки жидкости вблизи выходного отверстия форсунки при фиксированной частоте следования (2 кГц) [19]. Было показано, что искровой разряд приводит к увеличению угла раскрытия факела, а увеличение частоты немонотонным образом сказывается на амплитуде этого увеличения [20].

В настоящей работе проведено измерение эффективности пространственного распыления жидкости при различных частотах инициирования искрового разряда и при различных давлениях жидкости, подаваемой на форсунку вихревого типа. Измерены электрические параметры искрового разряда при различных частотах его инициирования.

Экспериментальная установка

Для создания распыла жидкости использовалась гидравлическая схема, представленная на правой части рисунка 1. Вода на форсунку 1 вихревого типа подавалась из резервуара 2 с помощью насоса 3 с электрическим приводом. Питание электромотора насоса осуществляется с помощью лабораторного

блока питания (мощность составляла около 20 Вт при всех давлениях воды). Вода, прежде чем быть распыленной, проходила демпфирующий пульсации давления резервуар 4 и фильтр тонкой очистки 5. Установка и контроль давления воды осуществлялись с помощью частично перекрываемого крана 6 и манометра 7. В результате за выходным отверстием форсунки образуется сложное пространственное течение жидкости 8: пленка жидкости, которая ниже по потоку, распадается на капли. Полученный распыл воды попадает обратно в резервуар 2. Электропроводность воды, использованной во всех экспериментах, составила 12 мкСм/см.

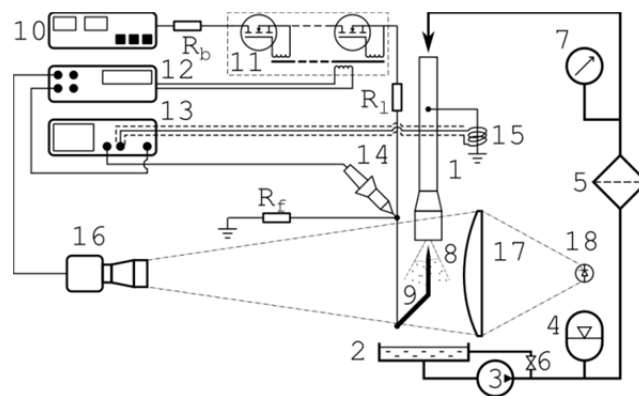


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Электрическая схема для инициирования искрового разряда представлена слева на рисунке 1. На заостренный электрод 9 диаметром 1 мм из нержавеющей стали, расположенный на оси форсунки таким образом, что его острие находилось внутри пленки жидкости, подавалось через балластный резистор R_b и полупроводниковый ключ 11 напряжение 14 кВ положительной полярности с высоковольтного источника с внутренней емкостью около 1 мкФ. Управление ключом осуществлялось с помощью программируемого многоканального генератора импульсов 12. Характерная длительность фронта нарастания напряжения на заостренном электроде составляла величину порядка 100 нс, при этом длительность спада напряжения с электрода (в случае без разряда) после закрытия ключа 11 задавалась величиной сопротивления R_f и емкостью схемы, и это время (несколько микросекунд) было значительно меньше периода следования импульсов. Резистор R_f был

относительно небольшого сопротивления и использовался для уменьшения амплитуды импульсов тока и, т. о. для уменьшения риска выхода из строя транзисторов ключа 11.

Напряжение на источнике 10, длительность открытого состояния ключа 11 (2 мкс), зазор между электродом 9 и поверхностью форсунки 1 были подобраны таким образом, чтобы искровой разряд гарантированно происходил во всем выбранном для исследования частотном диапазоне (до 40 кГц). Измерение электрических параметров осуществлялось с помощью цифрового запоминающего осциллографа 13 (200 МГц, 2 ГВыб./с, 120 000 осциллограмм в секунду), делителя напряжения 14 (1:1000, 100 МГц), токового пробника 15 (1В/А, 120 МГц). Для визуализации процесса распыления жидкости в присутствии искрового разряда теневым методом использовалась оптическая схема, представленная на рисунке 1 (снизу). Скоростная видеокамера 16 фокусировалась на область, в которой были видны пленка воды и искровой разряд внутри нее и капли распыла. Эта область освещалась постоянным потоком света от люминесцентного сверхъяркого светодиода 18. Скорость съемки составляла 1000 к/с при разрешении 800×800 пикселей и экспозиции 2 мкс.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 (сверху) представлены характерные осциллограммы тока и напряжения одного разряда, а также полученные наложением друг на друга в режиме накопления осциллограмм (в рамке). Из полученных осциллограмм процесса видно, что от разряда к разряду его электрические параметры сохраняются, а пропуски отсутствуют.

Источник высокого напряжения имеет встроенные цифровые индикаторы, что дает возможность определить средний по времени ток, протекающий в цепи во время эксперимента. На рисунке 2 (снизу) представлена зависимость этого тока от частоты инициирования разряда, из которого видно, что данная зависимость является линейной, что также косвенно свидетельствует о том, что пропуски разрядов при их инициировании в диапазоне частоты 0,1–40 кГц отсутствуют.

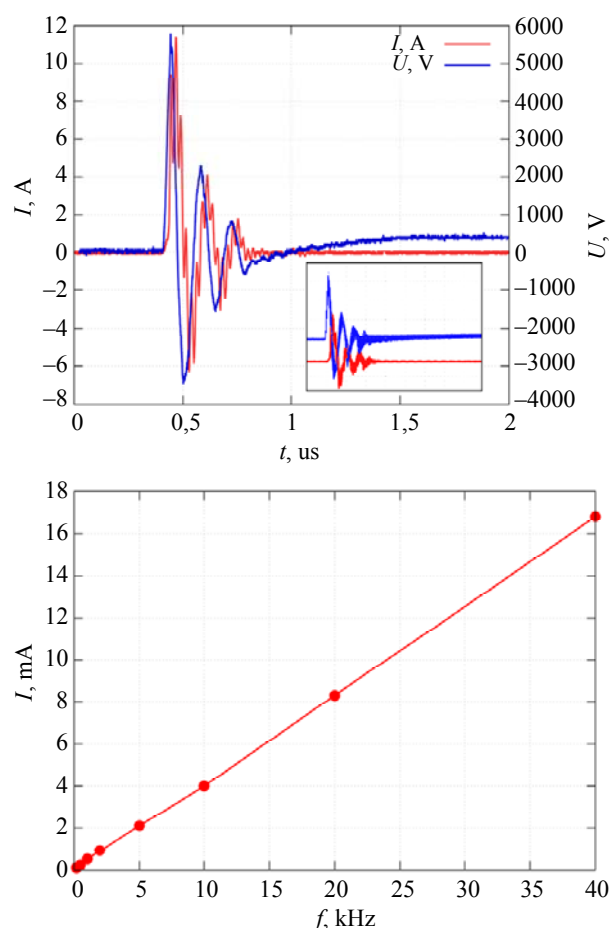


Рис. 2. Электрические характеристики разряда: осциллограммы тока и напряжения (сверху) и зависимость среднего тока в цепи от частоты следования разряда (снизу). В рамке – осциллограммы тока и напряжения в режиме накопления по нескольким разрядам

Данный график дает возможность оценить количество энергии, затрачиваемой на создание одного искрового разряда, как произведение тока, напряжения, периода следования разряда. Эта величина составляла в эксперименте около 5 мДж, что соответствует энергозатратам «от розетки». Следует отметить, что величина среднего тока является дополнительным индикатором правильной установки величины зазора между острием высоковольтного электрода и поверхностью форсунки: при увеличении зазора средний ток растет, а при уменьшении – падает. Наконец, интегрирование во времени произведения осциллограмм тока и напряжения (т. е. мощности) дает возможность оценить энергию одного разряда непосредственно в разрядном промежутке. Эта величина составила примерно 1 мДж для всего диапазона частот инициирования.

При выделении энергии вблизи (внутри) пленки жидкости, истекающей из отверстия форсунки, с помощью искрового разряда субмикросекундной длительности с длиной канала в несколько миллиметров и энергией порядка 1 мДж происходит формирование волны сжатия, распространяющейся с околозвуковой скоростью. Волна переносит импульс давления в пространстве, что может приводить к разрушению пленки жидкости, которая уже имеет на своей поверхности возмущения в виде неровностей. В отсутствие электрического разряда данные неровности приводят к разрушению пленки на капли на некотором расстоянии от выходного отверстия форсунки. При инициировании искрового разряда происходит воздействие на всю внутреннюю поверхность пленки, что приводит к ее разрушению на капли значительно быстрее, при этом волна сжатия сообщает им дополнительный импульс в направлении от оси отверстия форсунки. Это, в конечном счете, приводит к тому, что ширина конуса распыла жидкости при инициировании искрового разряда значительно увеличивается (рис. 3 и 4), т. е. увеличивается эффективность пространственного распыления жидкости.

Для количественной оценки этой эффективности в случаях без и с разрядом проведена скоростная теневая визуализация. Для этого при фиксированных частоте инициирования разряда и давлении воды проводилась теневая съемка распыла в течение двух секунд, первая из которых соответствовала случаю «без разряда», а вторая – «с разрядом». Затем проводился анализ полученных изображений методом, описанным в [20]. Кадры из первой и второй частей кинограммы отдельно усреднялись, проводилась нормализация интенсивности для уменьшения неравномерности фоновой подсветки. Затем проводился анализ интенсивности на усредненных кадрах вдоль прямой, проходящей перпендикулярно оси форсунки и на расстоянии от ее поверхности 10 мм. В результате измерялась ширина конуса распыла как расстояние между точками, в которых интенсивность падает до уровня, среднего между интенсивностью фоновой подсветки (капель нет) и минимальным значением внутри конуса распыла (наибольшее скопление капель). Эксперимент показывает, что при инициировании разряда во всем ча-

стотном диапазоне 0,1–40 кГц ширина конуса распыла увеличивается, а отношение измеренной ширины конуса H в случае «с разрядом» к ширине H_0 в случае «без разряда» может характеризовать увеличение эффективности пространственного распыления. На рисунке 3 представлена зависимость H/H_0 от частоты инициирования искрового разряда для различных значений давления воды.

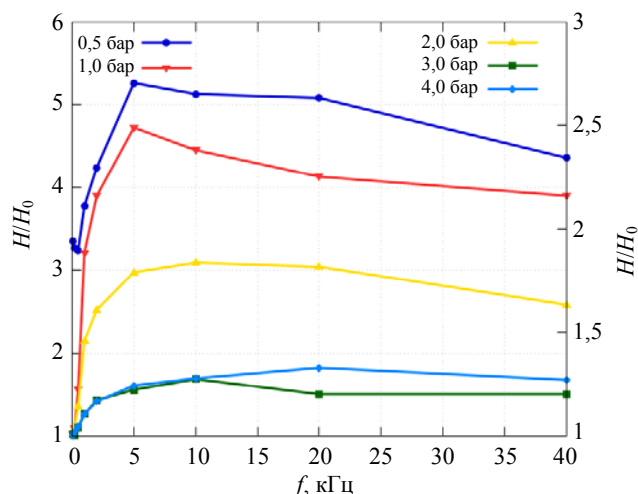


Рис. 3. Зависимость эффективности пространственного распыления H/H_0 от частоты инициирования искрового разряда f для различных значений давления воды. Для наглядности использованы две оси ординат для давления 0,5–1 бар (левая ось), 2–4 бар (правая ось)

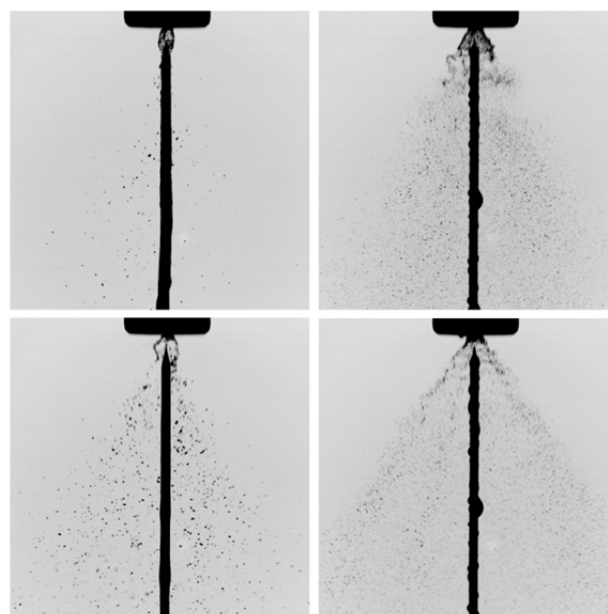


Рис. 4. Примеры отдельных кадров теневых кинограмм течения воды вблизи выходного отверстия форсунки (вверху без разряда, снизу с разрядом, инициируемым с частотой 40 кГц) при различных давлениях жидкости: слева 0,5 бар, справа 4 бар

На полученной зависимости видно, что H/H_0 имеет максимум в диапазоне частот 0,1–40 кГц, при этом величина частоты, соответствующая максимуму H/H_0 , увеличивается по мере увеличения давления. Кроме того, само значение максимума падает с увеличением давления воды. Следует отметить, что в случае давления воды 0,5–1 бар величина ширины конуса распыла H_0 является условной, т. к. при этом пленка жидкости касается поверхности электрода и не разрушается, т. е. не формируется конус распыла в привычном понимании. На рисунке 4 представлено сравнение двух мгновенных теневых фотографий течения воды из форсунки при давлении 0,5 бар и 4 бар для случаев «с разрядом» и «без разряда». Видно, что в случае избыточного давления воды 4 бар пленка разрушается на капли на некотором расстоянии от отверстия форсунки, при этом при давлении 0,5 бар пленка имеет т. н. форму тюльпана [3] и касается поверхности электрода ранее, чем разрушается, что приводит к отсутствию выраженного конуса распыла.

На кадрах, соответствующих случаям «с разрядом», видно существенное увеличение ширины конуса, а также то обстоятельство, что разрушение пленки происходит существенно раньше. Поскольку инициирование разряда происходит в импульсно-периодическом режиме, существует интервал времени, на протяжении которого пленка увеличивает свою длину. Если это время меньше, чем необходимая для полного восстановления величина, пленка в следующем импульсе разряда снова будет разрушена волной сжатия. Таким образом, можно говорить о существовании оптимального времени между импульсами следования искровых разрядов, и это объясняет наличие максимума на зависимости H/H_0 (см. рис. 3). Различная величина частоты, при которой отношение H/H_0 максимально, для различного избыточного давления может быть объяснена тем, что скорость роста пленки из отверстия определяется скоростью истечения жидкости, которая, в свою очередь, зависит от давления воды.

Полученное в эксперименте уменьшение величины максимума в зависимости H/H_0 при увеличении давления воды p объясняется тем, что при относительно низком p форма пленки жидкости оказывается близка не к поверх-

ности конуса (как в случае $p = 3$ –4 бар), а имеет форму поверхности тюльпана [3], что само по себе не обуславливает формирование широкого конуса распыла. А в случае давления 0,5–1 бар такая форма пленки приводит к тому, что ее край касается поверхности электрода до ее разрушения, и формирование капель затруднено, т. к. вода стекает по поверхности электрода без их образования. При давлении воды 0,5 бар определение величины H_0 по усредненным теневым фотографиям затруднено, поэтому в качестве этой величины взята максимальная ширина пленки. В случае относительно высокого давления p (3–4 бар) форма пленки является поверхностью конуса, что дает возможность достоверно определить величину H_0 . Известно, что после достижения давления воды некоторого значения (в данном эксперименте 3 бар) пленка и распыл в целом становятся полностью сформированными, дальнейшее повышение p не приводит к их качественному изменению [3]. Этим объясняется практически постоянное значение максимума зависимостей $H/H_0(f)$ для давления $p = 3$ –4 бар. Представляется, что для увеличения ширины конуса распыла H с помощью искрового разряда необходимо увеличивать его энергию, т. е. увеличивать амплитуду давления переносимой формируемой таким образом волной сжатия. Однако следует учитывать, что амплитуда давления растет с энергией разряда значительно медленнее, чем линейная зависимость [21], что ставит под вопрос целесообразность такого способа воздействия на процесс формирования распыла при высоких давлениях воды с точки зрения энергозатрат.

Выводы

Проведено исследование действия искрового разряда, инициируемого вблизи выходного отверстия форсунки в импульсно-периодическом режиме, на формирование конуса распыла жидкости. Энергия одного импульса разряда была фиксированна и составляла величину около 1 мДж, а частота инициирования варьировалась от 0,1 до 40 кГц. Избыточное давление воды варьировалось в диапазоне от 0,5 бар до 4 бар.

При инициировании искрового разряда вблизи выходного отверстия форсунки вихревого типа формируется волна сжатия в воздухе, действие которой на пленку жидкости, истекающей из форсунки, приводит к ее разрушению и образованию капель, имеющих дополнительный импульс в направлении от оси форсунки, что в целом приводит к увеличению эффективности пространственного распыления жидкости.

Зависимость увеличения эффективности пространственного распыления жидкости имеет максимум, величина которого уменьшается при увеличении давления воды. Это объясняется тем, что при относительно низком давлении жидкости сам по себе процесс распыления с помощью форсунки выбранного типа не является эффективным: форма пленки воды отличается от поверхности конуса, а капли, которые возникают из-за ее распада, сконцентрированы в основном на оси форсунки и имеют относительно небольшую скорость. При включении разряда, во-первых, пленка жидкости разрушается значительно раньше, а, во-вторых, образующиеся капли имеют дополнительную скорость, направленную в сторону от оси форсунки.

Факт существования максимума зависимости H/H_0 и увеличение значения $f_{\max}$ частоты инициирования искрового разряда, при котором достигается этот максимум, при увеличении давления воды объясняются скоростью роста пленки жидкости и ее зависимостью от параметров эксперимента. Поскольку скорость истечения жидкости возрастает монотонно от ее избыточного давления p (степенная зависимость с показателем около 0,5, [3]), а длина пленки практически слабо зависит от давления воды в диапазоне 3–4 бар, следует ожидать уменьшение времени роста пленки при увеличении p . По той же причине величина максимума H/H_0 слабо зависит от давления воды в диапазоне 3–4 бар, поскольку течение сформировано, и существенное увеличение эффективности пространственного распыления может быть осуществлено с помощью увеличения энергии в одном импульсе искрового разряда. Такое увеличение, с одной стороны, приведет к увеличению импульса капель, а с другой – к пропорциональному росту энергозатрат. Из представленных в работе

данных следует, что энергозатраты на увеличение эффективности пространственного распыления воды оказываются больше, чем энергозатраты на поддержание ее избыточного давления, в случае уже сформированного течения при $p = 3\text{--}4$ бар. При меньших давлениях воды энергозатраты на создание разряда оказываются сравнимы или меньше.

Полученные данные могут быть использованы при создании распылительных устройств (форсунок), в которых процесс распада пленки жидкости на капли контролируется путем создания вблизи выходного отверстия электрического разряда в импульсно-периодическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rayleigh L. / Proceedings of the London Mathematical Society. 1878. Vol. s1-10. № 1. P. 4–13.
2. Tyler E. / The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1933. Vol. 16. № 105. P. 504–518.
3. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and Sprays. – Boca Raton: CRC Press, 2017.
4. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications / ed. Ashgriz N. – US: Springer, 2011.
5. Lozano A., Call C. J., Dopazo C. / Proceedings of the Sixth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. – Italy, Napoli, 2023. P. 24–31.
6. Carvalho I., Heitor M., Santos D. / International Journal of Multiphase Flow. 2002. Vol. 28. № 5. P. 773–789.
7. Lenz H. P. Mixture Formation in Spark-Ignition Engines. – Vienna, Springer, 1992.
8. ASM Handbook: Vol. 7: Powder Metal Technologies and Applications 3rd ed. / ed. Lee P. W. – Ohio: ASM International, 2006.
9. Eslamian M., Ahmed M., Ashgriz N. / Nanotechnology. 2006. Vol. 17. № 6. P. 1674–1685.
10. Jayanthi G. V., Zhang S. C., Messing G. L. / Aerosol Science and Technology. 1993. Vol. 19. № 4. P. 478–490.
11. Chau A., Eslamian M., Ashgriz N. / Particle and Particle Systems Characterization. 2008. Vol. 25. № 2. P. 183–191.
12. NIST Special Publication 1069. Advanced Technology for Fire Suppression in Aircraft / ed. Gann R. G. – Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2007.
13. Gong J., Fan W., Peng J. / International Journal of Precision Agricultural Aviation. 2019. Vol. 2. № 1. P. 26–30.
14. Benther J., Pelaez-Restrepo J., Stanley C., Rosengarten G. / International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 178. P. 121587.

15. Hines R. L. / Journal of Applied Physics. 1966. Vol. 37. № 7. P. 2730–2736.
16. Kowalczyk P. B., Drzymala J. / Particulate Science and Technology. 2016. Vol. 34. № 6. P. 645–647.
17. Kudryashova O., Shalunov A., Genne D., Dorovskikh R., Titov S. / Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 22. P. 12330.
18. Савельев А. С., Узрюмов А. В. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 33–39.
19. Савельев А. С., Куликов Ю. М., Панов В. А. / Вестник ОИВТ РАН. 2025. Т. 17. С. 7–10.
20. Савельев А. С., Куликов Ю. М., Панов В. А. / Вестник ОИВТ РАН. 2025. Т. 18. С. 1–8.
21. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике (8-е издание). – М.: Наука, 1977.

PACS: 52.80.Wq

The effect of discharge on water spray from a vortex nozzle at different pressures

A. S. Saveliev*, V. A. Panov, Yu. M. Kulikov

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

* E-mail: fisteh@mail.ru

Received 15.04.2026; revised 28.05.2026; accepted 22.10.2026

The effect of a repetitively pulsed spark discharge initiated directly in the liquid film near the exit orifice of a vortex-type nozzle on the spatial atomization efficiency of water is studied experimentally. The discharge was ignited between a sharp high-voltage electrode (positive polarity, 14 kV) and the film surface. Measurements were performed over a discharge repetition frequency range of 0.1–40 kHz and water gauge pressures from 0.5 to 4 bar. Using high-speed shadowgraphy, the spray cone width was quantified, and the parameter H/H_0 was introduced to characterize the relative enhancement of spatial atomization when the discharge is applied. The H/H_0 vs. frequency dependence is found to be non-monotonic with a pronounced maximum; the frequency of this maximum shifts to higher values with increasing water pressure, while the peak magnitude decreases. Electrical measurements yield a single-discharge energy estimate of ~ 1 mJ and confirm the absence of misfires over the entire frequency range. The observed effect is attributed to the compression wave generated in the discharge channel, which imparts an additional radial momentum to the droplets and causes earlier film breakup. The energy efficiency of the method is discussed for different water pressures.

Keywords: aerosol, spark discharge, nozzle.

REFERENCES

1. Rayleigh L., Proceedings of the London Mathematical Society **s1-10** (1), 4–13 (1878).
2. Tyler E., The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **16** (105), 504–518 (1933).
3. Lefebvre A. H. and McDonell V. G. Atomization and Sprays. Boca Raton: CRC Press, 2017.
4. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications / ed. Ashgriz N. US: Springer, 2011.
5. Lozano A., Call C. J., and Dopazo C. Proceedings of the Sixth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Italy: Napoli, 2023, pp. 24–31.
6. Carvalho I., Heitor M., and Santos D., International Journal of Multiphase Flow **28** (5), 773–789 (2002).
7. Lenz H. P. Mixture Formation in Spark-Ignition Engines. Vienna: Springer, 1992.
8. ASM Handbook: Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications 3rd ed. / ed. Lee P. W. Ohio: ASM International, 2006.
9. Eslamian M., Ahmed M., and Ashgriz N., Nanotechnology **17** (6), 1674–1685 (2006).

10. Jayanthi G. V., Zhang S. C., and Messing G. L., *Aerosol Science and Technology* **19** (4), 478–490 (1993).
11. Chau A., Eslamian M., and Ashgriz N., *Particle and Particle Systems Characterization* **25** (2), 183–191 (2008).
12. NIST Special Publication 1069. *Advanced Technology for Fire Suppression in Aircraft* / ed. Gann R. G. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2007.
13. Gong J., Fan W., and Peng J., *International Journal of Precision Agricultural Aviation* **2** (1), 26–30 (2019).
14. Benthier J., Pelaez-Restrepo J., Stanley C., and Rosengarten G., *International Journal of Heat and Mass Transfer* **178**, 121587 (2021).
15. Hines R. L., *Journal of Applied Physics* **37** (7), 2730–2736 (1966).
16. Kowalczyk P. B. and Drzymala J., *Particulate Science and Technology* **34** (6), 645–647 (2016).
17. Kudryashova O., Shalunov A., Genne D., Dorovskikh R., and Titov S., *Applied Sciences* **13** (22), 12330 (2023).
18. Saveliev A. S. and Ugryumov A. V., *Applied Physics*, № 5, 33–39 (2024) [in Russian].
19. Saveliev A. S., Kulikov Yu. M., and Panov V. A., *Vestnik Obedinennogo Instituta Vysokih Temperatur* **17**, 7–10 (2025) [in Russian].
20. Saveliev A. S., Kulikov Yu. M., and Panov V. A., *Vestnik Obedinennogo Instituta Vysokih Temperatur* **18**, 1–8 (2025) [in Russian].
21. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* (8-e izdanie). Moscow: Nauka, 1977 [in Russian].

Об авторах

Савельев Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Москва, Россия). E-mail: fisteh@mail.ru SPIN-код: 6888-7369, AuthorID: 866343

Панов Владислав Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Москва, Россия). E-mail: panovvladislav@gmail.com SPIN-код: 5821-2776, AuthorID: 755538

Куликов Юрий Матвеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Москва, Россия). E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru SPIN-код: 7719-8459, AuthorID: 1130937