

Воздействие искровым разрядом на пленку воды вблизи выходного отверстия форсунки

А. С. Савельев, Ю. М. Куликов и В. А. Панов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: fisteh@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2025 г.

Аннотация. Предложена схема зажигания периодического (2 кГц) искрового разряда, вызываемого импульсами напряжения прямоугольной формы амплитудой 14 кВ и длительностью 2 мкс, вблизи форсунки, создающей распыл из воды с относительно небольшой проводимостью 300 мкСм/см. Измерения теневым оптическим методом показывают, что зажигание разряда приводит к изменениям параметров распыла — уменьшению длины, на которой происходит распад пленки жидкости на отдельные капли, а также к увеличению угла конуса факела распыла. Эти изменения связаны с формированием волн сжатия (ударных волн), которые приводят к ускорению разрушения пленки за счет быстрого локального повышения давления на поверхности жидкости при инициировании искрового пробоя промежутка, но не связаны с внедрением электрического заряда в капли из-за крайне малого времени воздействия (2 мкс) по сравнению с периодом (500 мкс).

1. ВВЕДЕНИЕ

Распылительные устройства играют значительную роль в современной технике [1, 2] и используются повсеместно: для распыления топлива в двигателях внутреннего сгорания [3], для получения порошков и сплавов путем распыления расплавов металлов [4], при распылительном пиролизе, распылительной сушке и распылительной сублимационной сушке [5–7], в системах пожаротушения [8], в сельском хозяйстве [9], в системах капельного охлаждения [10], при нанесении лакокрасочных покрытий [11] и др.

Многообразие технических решений для создания различных типов форсунок можно разделить на следующие основные группы. Работа *гидравлических форсунок* основана на прохождении жидкости через отверстие под действием высокого давления. Существуют струйные, вихревые, двухсопловые, веерные форсунки и с перепуском. Конструкция *центробежной форсунки* предусматривает подачу жидкости на вращающийся диск, ее дробление на капли происходит за счет центробежных сил. В схеме *пневматических форсунок* используется дополнительный газ под давлением, а подача его реализуется как до выхода из сопла (формирование пузырьков в жидкости), так и после него — разрушение струи жидкости при взаимодействии со струей газа. В случае *ультразвуковых форсунок* используются колебания поверхности, на которую подается пленка жидкости, для ее разрушения на капли. Для *электростатических форсунок* используют дополнительную электрическую зарядку капель, которая приводит к их дроблению.

Работа большинства форсуночных устройств характеризуется расходом, углом раскрытия и формой факела распыления, распределением массы жидкости в факеле по пространству, распределением капель по диаметру (или средним значением, например, по Заутеру D_{32}) [12]. Актуальным является улучшение параметров работы таких устройств при сохранении остальных параметров, например, уменьшение среднего диаметра распыла D_{10} при сохранении расхода жидкости.

Оптимизация работы форсуночных устройств может выполняться:

1. за счет изменения рабочих параметров и конструкции самой форсунки (давление, размеры и расположение внутренних каналов, размеры и геометрия выходного отверстия, и т.д.);
2. за счет изменения реологических свойств рабочей жидкости;
3. за счет использования дополнительных внешних устройств для изменения характеристик распыла.

В работе [13] на основе численного моделирования с последующей экспериментальной проверкой решалась задача оптимизации пневматической форсунки для уменьшения неравномерности наносимого покрытия. Оптимизация проводилась по следующей группе параметров: давление на оси струи, диаметр кольцевого воздушного отверстия, угол раскрытия форсунки, давление воздуха в кольцевом зазоре, давление воздуха в спутной формирующей струе. В работе [14] проводилась оптимизация устройства и режимов работы воздушного двухступенчатого центробежного распылителя. В качестве ключевых параметров рассматривались средний размер капли, и также распределение капель по размеру. Изучалось влияние частоты вращения подвижных частей центробежной форсунки и числа механических рассекателей потока. Авторы [15] оптимизировали конструкцию аэрозольного микрораспылителя для легочных ингаляций, применяемых в ветеринарии. На основе численного моделирования была создана модель вихревого распылителя, установленного внутри капилляра с внутренним диаметром 0.6 мм. Ключевыми параметрами выступали степень закрутки, диаметр сопла и размер вихревого канала. В работе [16] проведена оптимизация основных параметров для двухжидкостных форсунок с внутренней камерой смешения. Было показано, что при определенных экспериментальных условиях происходит заклинивание сопла по расходу, и наблюдается звуковое истечение, при котором достигаются оптимальные характеристики работы. Авторы [17] экспериментально и теоретически исследовали характеристики распыления мазута и дизельного топлива:

диаметр капель, угол распыления, длину распада струи и распределение капель по размерам. С использованием метода теневой съемки были получены фотографии распыленного топлива, которые затем обрабатывались с помощью программного обеспечения для анализа изображений. Размер и скорость капель распыления топлива прогнозировались с помощью метода максимальной энтропии. Полученные данные позволили установить предельный режим работы форсунки. Технология распыла перегретой воды находит все более широкое применение в практике пожаротушения на объектах энергетики, в замкнутых помещениях, при проливе нефтепродуктов, операциях с сжиженным газом и других ситуациях. В работах [18, 19] представлены результаты комплексного исследования процесса фрагментации воды при ее истечении через форсунки различного типа при температуре рабочего тела 140–260°C и давлении за срезом сопла 0.1 МПа. Установлено, что структура факела распыла носит явно выраженный бимодальный характер: капли диаметром 5–8 мкм сочетаются с субмикронной модой, а также продемонстрирована возможность дополнительного регулирования пиковой мощности газотурбинных установок.

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. Применение данных способов не всегда возможно, т.к. высокое давление дает дополнительную механическую нагрузку, заужение выходного отверстия повышает риски засорения, а модификация реологических свойств жидкости с помощью присадок не всегда допустима. В этом случае возможны, например, внешний поддув газом и ультразвуковое воздействие для более раннего распада пленки.

Ранее [20] авторами был предложен метод электрического воздействия на факел с помощью инициации барьерного разряда между пленкой жидкости, возникающей вблизи выходного отверстия вихревой форсунки, и кольцевым покрытым диэлектриком электродом, что позволило увеличить общее число капель в единицу времени на 10% и заметно уменьшить их диаметр D_{32} в центральной области распыла при сохранении расхода жидкости. Однако данный метод практически не влиял на форму факела форсунки. В настоящей работе предложен метод интенсификации распада пленки и увеличения угла раскрытия факела распыла вихревой форсунки при помощи инициирования искрового разряда.

Если применение барьерного разряда приводит к зарядке капель и ускорение распада пленки за счет создания периодических ее возмущений, действие электрического поля может быть преобразовано в механическое воздействие ударной волны в искровом разряде. Современные высоковольтные полупроводниковые ключи позволяют существенно повысить эффективность такого преобразования по сравнению с неконтролируемой разрядкой ударной емкости (высоковольтного конденсатора) в дуговой фазе разряда за счет возможности размыкания тока после прохождения искры и формирования ударной волны.

Ударно-волновое воздействие возможно для вихревых, центробежных, веерных форсунок, где, как прави-

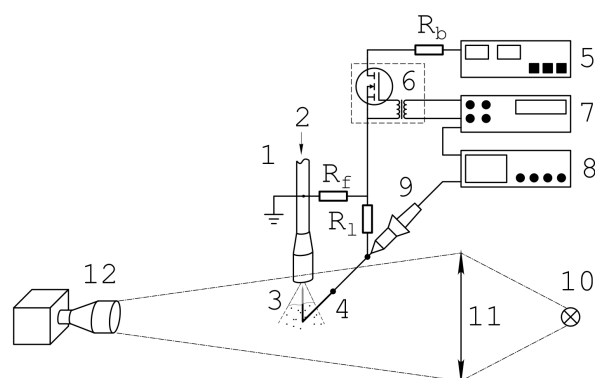


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

ло, сначала формируется пленка, а затем происходит ее распад на капли, интенсивность которого можно поднять за счет быстрого локального повышения давления газа, в котором происходит течение жидкости. Более перспективным представляется применение искрового разряда для генерации скачков давления в случае вихревой форсунки, т.к. канал разряда, его сферическая волна и факел обладают осевой симметрией (в отличие, например, от веерной). Таким образом, формирование искрового разряда вблизи относительно небольшой области, занимаемой пленкой жидкости, позволяет организовать ударно-волновое воздействие с минимальным затуханием (связанным с распространением сферической волны в пространстве).

Цель работы — исследование процесса разрушения пленки жидкости в присутствии локального энерговыделения с помощью искрового разряда, инициируемого в импульсно-периодическом режиме.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. На форсунку 1 вихревого типа подается фильтрованная техническая вода (показана стрелкой 2) относительно небольшой проводимости (~ 300 мкСм/см) под избыточным давлением 2 бар. В результате в пространстве под выходным отверстием форсунки формируется конус распыла жидкости (3), состоящий из пленки воды в форме поверхности конуса, области частичного ее распада и области разлета образовавшихся капель. Расход жидкости при указанном давлении составляет ~ 1 г/с. Корпус форсунки выполнен из металлического сплава, не подверженного коррозии в воде, и заземлен.

Для инициирования искрового разряда внутри пленки жидкости расположен заостренный (высоковольтный) электрод 4, выполненный из медной проволоки диаметром 0.6 мм, подключенный к схеме формирования высоковольтных импульсов. Конец электрода расположен на оси форсунки с диаметром выходного отверстия 0.3 мм и на расстоянии 2 мм от него. Электрическая схема состоит из высоковольтного источника напряжения (5) с регулируемым выходным напряжением, ограничивающего ток резистора R_b (100 кОм), высоковольтного полупроводникового ключа с изолированным входом управления 6, резистора, обеспечивающего

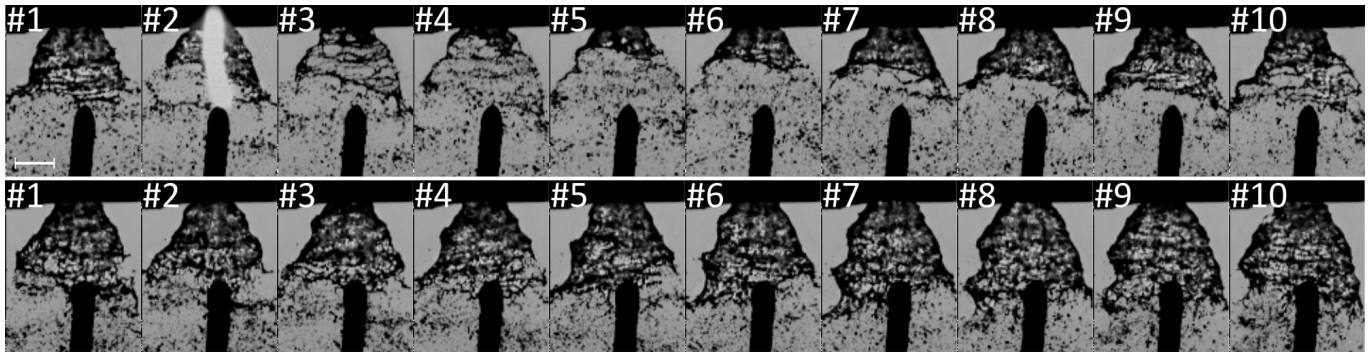


Рисунок 2. Динамика разрушения пленки воды, истекающей из отверстия вихревой форсунки, под действием периодического (2 кГц) искрового разряда длительностью 2 мкс (верхний ряд) и без воздействия (нижний ряд). Частота следования кадров 18786 кадр/с (период ~ 53 мкс), время экспозиции 2 мкс. Размер масштабной линейки 1 мм.

быстрый спад напряжения R_f (200 кОм), ограничивающего разрядный ток резистора R_1 (50 Ом). Внутренняя емкость источника составляет около 1 мкФ. Длительность импульсов — 2 мкс, амплитуда — 14 кВ, частота следования — 2 кГц.

Управление состоянием ключа выполнялось с помощью цифрового многоканального генератора 7, соответствующий сигнал которого подавался также и на один из каналов цифрового осциллографа 8 (100 МГц, 2 Гвыб/с). На другой канал осциллографа подавался сигнал с высоковольтного делителя 9 (1:1000, 100 МГц), который подключался к высоковольтному электроду. Регистрация осциллограмм напряжения на электроде позволяла измерить задержку между запускающим низковольтным сигналом и началом искрового разряда. В случае, если эта задержка была существенной по сравнению с задержкой открытия ключа (около 200 нс), то напряжение на высоковольтном источнике увеличивалось. Таким образом обеспечивалась точно заданная частота инициирования разряда, а величина пробойного напряжения была практически одинакова от разряда к разряду.

Для оптической визуализации распыла жидкости использовалась теневая система, состоящая из источника света 10 (люминесцентный светодиод), собирающей линзы 11 достаточной апертуры для подсветки области распыла, скоростной монохромной цифровой видеокамеры с макрообъективом 12. Пространственное разрешение оптической системы составляло 0.06 мм/пиксель, скорость съемки была 18786 к/с при разрешении 256x192. Экспозиция кадров была 2 мкс, что значительно меньше характерного гидродинамического времени, но значительно больше длительности искрового разряда.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлена характерная кинограмма динамики факела форсунки между двумя последовательными искровыми разрядами (верхний ряд снимком) и в отсутствие электрического воздействия (нижний ряд). Частота следования импульсов напряжения — 2 кГц, длительность — 2 мкс, напряжение — 14 кВ. Частота следования кадров составляет 18786 кадр/с, время экспозиции — 2 мкс. Кадр #1 соответствует моменту

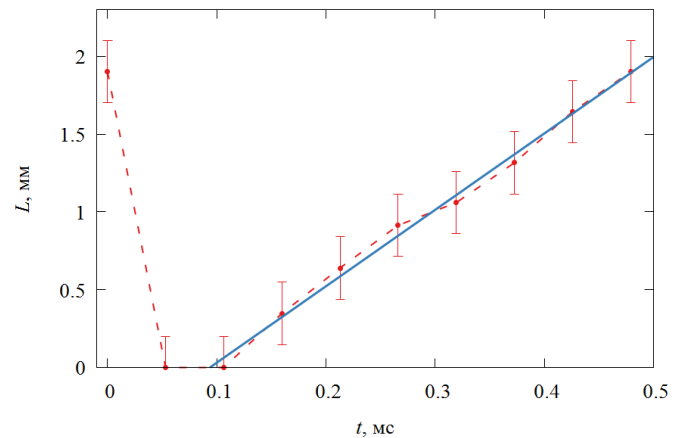


Рисунок 3. График зависимости длины L пленки воды вдоль оси форсунки от времени t (момент $t = 0$ соответствует кадру #1 кинограммы, рисунок 2).

времени до подачи разряда. Длина вдоль оси участка пленки жидкости до начала ее разрушения на капли составляет примерно 2 мм. На кадре #2 виден искровой разряд в виде светящегося шнура, соединяющего конец высоковольтного электрода и заземленную поверхность форсунки. После этого происходит сегментация пленки (кадр #3), образование лигаментов и распад на отдельные капли (кадр #4). Затем начинается рост новой пленки на кадрах #5–#10.

График зависимости длины пленки L вдоль оси форсунки от номера кадра приведен на рисунке 3. Для кадров #3–#10 построена линейная аппроксимация (прямая на рисунке 3), которая дает среднюю скорость увеличения $\Delta L / \Delta t \sim 5$ м/с.

Действие периодического искрового разряда увеличивает полный угол раскрытия факела форсунки со значений 45° – 55° до 65° – 75° .

Параметры расхода и частота следования разрядов подобраны таким образом, что длины пленки и искрового канала примерно совпадают в момент его зажигания с целью увеличить эффективность воздействия. Это также увеличивает стабильность угла раскрытия, поскольку вся жидкость, сосредоточенная в пленке, а затем и в каплях, получает импульс в радиальном направлении.

Таким образом, изменяя частоту следования искровых разрядов, можно управлять длиной установления факела, то есть минимальным расстоянием от отверстия форсунки, на котором происходит дробление жидкости на отдельные капли. Это расстояние может варьироваться от максимального значения, определяемого развитием неустойчивости в пленке без электрического воздействия, до практически нулевого при достаточно большой скорости расширения объема газа, нагретого искровым разрядом. В этом случае определяющей будет роль энергетической целесообразности, т.к. доля энергии, выделяемой на этапе горения дуги, будет возрастать по сравнению с этапом инициации электрического пробоя и формирования ударной волны, что в целом снизит энергоэффективность в расчете на единицу расхода жидкости. Однако такое решение может оказаться единственно возможным в случаях, когда приоритетом являются габариты установки, и отсутствует возможность увеличения расстояния от форсунки до объекта (или рабочего процесса).

4. ВЫВОДЫ

В работе показано, что быстрое локальное энерговыделение вблизи пленки жидкости с помощью искрового разряда приводит к ее разрушению (дроблению), которое наступает раньше, чем разрушение за счет развития неустойчивости на поверхности пленки, а также приводит к увеличению полного угла раскрытия факела форсунки на $\sim 20^\circ$.

Механизм действия искрового разряда на пленку жидкости заключается в иницировании волн сжатия (ударных волн) вблизи нее, что приводит к разрушению пленки за счет быстрого локального повышения давления на поверхности жидкости. В данном случае, время электрического воздействия составляет лишь малую величину от периода зажигания искры, что означает отсутствие прямого (не опосредованного через искру и давление) воздействия на капли и пленку электрическим полем. Это важно для систем, в которых капли жидкости несут заряд (например, электростатическое нанесение лакокрасочных покрытий).

Полученный эффект может использоваться при проектировании устройств распыления жидкости, таких как вихревая форсунка. В связи с тем, что время, необходимое на восстановление пленки жидкости, составляет относительно большую величину за счет небольшой скорости истечения из форсунки, иницирование локального энерговыделения с помощью искрового разряда может выполняться относительно небольшой

частотой повторения импульсов напряжения. Это означает, что средний по времени энерговыклад, требуемый для разрушения пленки, составляет небольшую величину по сравнению с мощностью, требуемой для создания потока жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashgriz N (ed) 2011 *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* (New York: Springer)
2. Lefebvre A H 1983 *Gas turbine combustion* (McGraw-Hill series in energy, combustion, and environment) (Washington: Hemisphere Pub. Corp.) includes bibliographical references and indexes
3. Lenz H P 1992 *Mixture Formation in Spark-Ignition Engines* (Vienna: Springer)
4. Lee P W (ed) 2006 *ASM Handbook: Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications* 3rd ed (Materials Park, Ohio: ASM International)
5. Eslamian M, Ahmed M and Ashgriz N 2006 *Nanotechnology* **17** 1674–1685
6. Jayanthi G V, Zhang S C and Messing G L 1993 *Aerosol Science and Technology* **19** 478–490
7. Chau A, Eslamian M and Ashgriz N 2008 *Particle and Particle Systems Characterization* **25** 183–191
8. Gann R G (ed) 2007 *NIST Special Publication 1069. Advanced Technology for Fire Suppression in Aircraft* (Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology)
9. Hu S, Xu X, Liu J, Guo J, Guan R, Zhou Z, Lan Y and Chen S 2024 *Agriculture* **14** 1994
10. Benthier J, Pelaez-Restrepo J, Stanley C and Rosengarten G 2021 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **178** 121587
11. Hines R L 1966 *Journal of Applied Physics* **37** 2730–2736
12. Kowalczyk P B and Drzymala J 2016 *Particulate Science and Technology* **34** 645–647
13. Qiao W, Qian L, Zhu C and Liu J 2022 *Advances in Mechanical Engineering* **14** 1–19
14. Yang Z, Yu J, Duan J, Xu X and Huang G 2023 *Agriculture* **13** 430
15. Zhang Z, Yang W, Chen J, Liu Y and Wang X 2021 *Journal of Physics: Conference Series* **1995** 012003
16. Ferreira G, García J A, Barreras F, Lozano A and Lincheta E 2009 *Fuel Processing Technology* **90** 270–278
17. Rostami E and Mahdavy Moghaddam H 2024 *Results in Engineering* **21** 101692
18. Zalkind V I, Zeigarnik Y A, Nizovskiy V L, Nizovskiy L V and Shchigel' S S 2023 *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* **64** 388–392
19. Зейгарник Ю А, Залкинд В И, Низовский В Л, Низовский Л В, Щигель С С и Маслакова И В 2023 *Теплоэнергетика* **9** 68–76
20. Савельев А С и Угрюмов А В 2024 *Прикладная физика* **5** 33–39