

Эффект частоты искрового разряда при воздействии 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 21 августа 2025 г.

Аннотация. Исследовано влияние частоты следования импульсов искрового разряда, инициируемого вблизи выходного отверстия вихревой форсунки, на угол раскрытия факела распыла, граница которого представляет собой поверхность конуса. Показано, что инициирование разряда на оси форсунки между выходным отверстием и внешним электродом, расположенным на расстоянии 2 мм ниже по потоку, приводит к увеличению угла раскрытия за счет воздействия волнами сжатия. Длительность импульса искрового разряда — порядка 1 мкс, максимальное напряжение в электрической схеме его инициирования — 13 кВ. В исследованном диапазоне частот от 100 Гц до 20 кГц обнаружен максимум увеличения полного угла раскрытия факела вблизи выходного отверстия при 10 кГц, составляющий 20° (с 45° до 65° , +45%), при этом основной рост угла наблюдается в диапазоне 100–3000 Гц. Наблюдаемый эффект наиболее вероятно связан с соотношением между периодом следования импульсов (T_1) и временем (от момента ее разрушения разрядом) роста пленки жидкости (T_2) вблизи выходного отверстия форсунки до начала ее распада на лигаменты и капли: при $T_1 \gg T_2$ эффект искового воздействия выражен слабо, т.к. большую часть времени воздействие волн сжатия на пленку жидкости отсутствует; при $T_1 \sim T_2$ разряд воздействует на максимальную площадь пленки и всю расходуемую через форсунку жидкость; при $T_1 < T_2$ площадь пленки сокращается, но еще возможно увеличение передаваемого импульса давления; при $T_1 \ll T_2$ пленка жидкости не успевает удлиниться, разряд воздействует только на часть вблизи выходного отверстия, где ее толщина слишком велика для распада.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распыление жидкости представляет собой процесс, в котором разрушающее действие сил инерции и внешних аэродинамических сил противостоит влиянию вязкости жидкости и силе поверхностного натяжения. Теоретический и экспериментальный анализ механизма распыления проводились в работах [1] и [2], а подробные обзоры более ранних работ были выполнены в [3] и [4].

Сложность данного явления связана с влиянием различных параметров на начальный распад струи жидкости, которые включают условия течения внутри инжектора, характеристики турбулентности и ее затухание вдоль жидкого ядра перед распадом, взаимодействие жидкости с окружающей средой, развитие волн вдоль поверхности жидкости, которые при определенных условиях разрушаются, образуя лигаменты и капли, а также двухфазную природу течения [5, 6].

Спреи и другие дисперсные потоки обычно имеют плотные (dense) и разреженные (diluted) режимы течения [7]. Плотная область распыления возникает вблизи выхода форсунки (инжектора) и является переходной между жидкой пленкой и разреженной капельно-дисперсной фазой. Плотные области характеризуются жидкими частицами неправильной формы, называемыми лигаментами, столкновениями между объемами жидкости, эффектами объемных долей для скорости переноса межфазной границы и разрушением жидких частиц. Данный режим течения трудно описать как теоретически, так и экспериментально. Экспериментальные трудности возникают из-за того, что поток, как правило, непрозрачен для оптической диагностики. Таким образом, оптимизация конструкции распылителя требует хорошего понимания физического процесса, связанного с распылением.

Неустойчивость на границе раздела жидкого слоя возникает из-за нарушения равновесия сил инерции и поверхностного натяжения. Данное явление имеет место при высоких числах Вебера ($800 < We < 30000$), и сопровождается асимметричными волнами большой амплитуды, которые усиливают распад пленки жидкости [8]. Волны вызываются внешними (аэродинамическими) силами, действующими на границу раздела воздух–жидкость, их начальная амплитуда и инкремент неустойчивости будут определяться относительной величиной данных сил. Амплитуда волны увеличивается по мере ее распространения вниз по течению, пока она не потеряет устойчивость и не разрушится. При увеличении разрыва скорости между жидкостью и окружающим газом амплитуда и инкремент неустойчивости (скорость роста) поверхностных волн на границе раздела увеличивается, что приводит к отрыву тонких лигаментов и мелких капель от поверхности жидкости. Однако по мере увеличения импульса жидкости (жидкой струи), внутреннее ядро жидкости не будет подвергаться воздействию окружающего газа. Другими словами, влияние сдвига будет ограничено тонкой областью вблизи поверхности, то есть характерные масштабы длины возмущений, которые могут вызвать разрыв, малы по сравнению с толщиной слоя жидкости. Это говорит о том, что сдвиговое напряжение не может разрушить внутреннее ядро и привести к полному распаду слоя жидкости. Последнее утверждение подчеркивает тот факт, что процесс распыления не является чисто сдвиговым явлением, особенно для случаев, когда жидкость обладает большим импульсом. Сдвиг может влиять на распыление на границе раздела и в областях, расположенных далеко ниже по течению, где доминирует вязкость. То есть, на некотором расстоянии вниз по течению толщина внутреннего ядра становится сравнимой

с размером возмущений, что приводит к крупномасштабному распаду. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока силы поверхностного натяжения на поверхности капель не станут достаточно большими, чтобы предотвратить дальнейший разрыв.

Распыление жидкости является важнейшим производственным процессом, который находит применение в самых разных областях. Со временем были разработаны многочисленные методы и устройства распыления [9]. Гидравлическое распыление жидкости является наиболее распространенным методом, при котором жидкость преобразуется в капли при протекании через отверстие сопла под высоким давлением. Этот процесс широко применяется в промышленности и сельском хозяйстве [10]. Данный метод позволяет добиться высокой производительности при высоких давлениях (до 1 л/с), однако размер капель при этом составляет 100–500 мкм и более. Требования конкретных технологических приложений обусловили многообразие технических схем (методов) распыления [3, 11–13]: в одних случаях требуется высокая дисперсность и узкое распределение размеров капель, в других — определенная геометрия распыления, в третьих — постоянная скорость распыления и т.д. Существует ряд задач, требующих как высокой дисперсности капель, так и высокой производительности распыления. В работе [14] был предложен новый метод распыления жидкости, сочетающий высокую дисперсность и высокую производительность на основе акустогидравлической форсунки. Данный метод сочетает в себе преимущества ультразвукового распыления, позволяющего получать стабильное распыление с узкой функцией распределения по размерам, и гидравлического, позволяющего получить высокие расходы. Полученные результаты показывают, что предлагаемая конструкция позволяет достигать размеров капель менее 50 мкм при расходе около 5–10 мл/с при частоте воздействия 22,5 кГц.

В работах [15, 16] исследуется распыление плоского ламинарного слоя жидкости, полученного косым соударением двух струй жидкости и подвергнутого поперечному акустическому воздействию в неподвижной окружающей среде. Акустическое воздействие возмущает слой жидкости перпендикулярно его плоскости, тем самым создавая последовательность синусоидальных волн, распространяющихся радиально от точки соударения. Эти возмущения слоя растут по мере уменьшения скорости волны к краю слоя, а протяженность устойчивого состояния и средний размер капли резко уменьшаются по сравнению с естественным разрывом. Наблюдения показывают, что эффект акустического поля проявляется в непрерывном диапазоне частот воздействия. Однако существует частота, при которой эффект внешнего акустического поля становится несущественным. Установлено, что частота отсечки является возрастающей функцией числа Вебера. В работе [17] полученные экспериментальные результаты анализировались с помощью спектральных разложений изображений возмущенных жидких слоев, в том числе с использованием собственно ортогонального разложения (POD) и разложения по динамическим модам (DMD). Аналогичная постановка (две сталкивающиеся струи с акустическим воздействием) исследовалась в работе [18]. Жидкая пленка, образованная столкновением

двух коллинеарных струй воды, подвергается воздействию акустических волн различной частоты, имитирующих колебания давления внутри камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя. Эксперименты проводились как для устойчивого, так и для неустойчивого состояния (движения) пленки при $500 < We < 1300$. Эксперименты показывают, что для заданного числа Вебера пленка имеет набор собственных частот, лежащих в диапазоне 100–600 Гц, причем этот набор меняется в зависимости от We . В работе [19] на основе высокоскоростной теневой визуализации изучено влияние акустических колебаний на первичное распыление полого конуса с дополнительной закруткой воздушным вихрем.

Выполненный обзор литературы показал, что наиболее эффективного распыления удается достигнуть благодаря сочетанию нескольких факторов воздействия на поток (постоянное высокое давление, акустическое воздействие, закрутка). Ранее авторами исследовалось влияние барьерного разряда на распределение капель по диаметру [20] и динамика распада пленки жидкости вблизи выходного отверстия форсунки под действием искровых разрядов при фиксированной частоте их следования (2 кГц) [21]. Было показано, что барьерный разряд (10 кВ, 5 кГц) приводит к увеличению количества капель в факеле, а искровой (14 кВ, 2 кГц) — к увеличению угла раскрытия.

Цель данной работы — исследование влияния частоты следования искровых разрядов на процесс разрушения пленки жидкости, образующейся при истечении из вихревой форсунки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Для создания воздушно-капельного потока (конуса распыла (2)) с помощью форсунки вихревого типа (1) используется гидравлическая схема замкнутого типа, в состав которой входят бак (3) для сбора воды, водяной мембранный насос (4) регулируемого давления, газовый гидроаккумулятор (5) для демпфирования скачков давления, фильтр (6) для очистки от частиц воды, способных засорить форсунку, манометр (7) для контроля постоянного параметров эксперимента. При включении насоса на форсунку подается вода под постоянным избыточным давлением 3 бар, при этом под ее выходным отверстием формируется квазистационарное двухфазное течение сложной конфигурации, происходящее в направлении сверху вниз относительно направления поля тяжести. Течение состоит из пленки жидкости, формирующейся непосредственно после выходного отверстия форсунки, которая в силу гидродинамической неустойчивости распадается на капли, образующие конус распыла.

Для воздействия на течение электрическим (искровым) разрядом собрана электрическая схема, показанная на рисунке 1. Заостренный конец электрода (8) (медная проволока диаметром 1 мм) располагается внутри пленки жидкости на расстоянии 2 мм от выходного отверстия форсунки, так что сам по себе электрод не влияет на процесс ее распада на капли. Высокое напряжение на электрод подается от источника напряжения (9) (13 кВ) через балластный резистор R_b сопротивлением 100 кОм, высоковольтный полупроводниковый

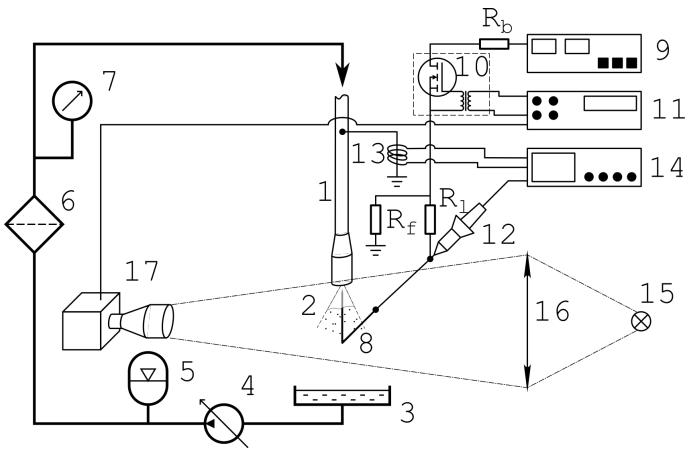


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 — форсунка, 2 — конус распыла, 3 — емкость сбора воды, 4 — насос, 5 — демпфирующая емкость, 6 — фильтр, 7 — манометр, 8 — заостренный электрод, 9 — источник высокого напряжения, 10 — высоковольтный ключ, 11 — генератор импульсов, 12 — делитель напряжения, 13 — токовый датчик, 14 — осциллограф, 15 — светодиод, 16 — линза, 17 — видеокамера.

ключ (10) и ограничивающий ток разряда резистор R_l (50 Ом). Поскольку форсунка заземлена, искровой разряд происходит по кратчайшему пути между острием электрода и поверхностью форсунки. Следует отметить, что форсунка соединена с гидравлической системой с помощью диэлектрического шланга относительно большой длины, что предотвращает дополнительную утечку электрического тока. В связи со значительными размерами (порядка метра) электрической схемы, отдельные ее части имеют относительно большие величины паразитной емкости, что обуславливает необходимость ограничения тока и до, и после полупроводникового ключа (10) для обеспечения устойчивого режима его работы без превышения предельно допустимых параметров работы. Кроме того, для обеспечения быстрого фронта спада напряжения на электроде используется резистор R_f сопротивлением 200 кОм. Таким образом, в случае без инициирования искрового разряда скорость нарастания и спада высокого напряжения на электроде составляет величину порядка 100 нс. Управление работой ключа осуществляется с помощью многоканального цифрового генератора прямоугольных импульсов (11).

Для измерения напряжения на высоковольтном электроде 8 используется делитель напряжения (12) (1:1000) с полосой пропускания 100 МГц. Для измерения тока разряда используется бесконтактный пробник (13) на основе эффекта Холла с полосой пропускания 100 МГц. Сигналы этих датчиков подаются на цифровой запоминающий осциллограф (14) с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 2 ГГц. Запуск осциллографа осуществляется по фронту нарастания сигнала датчика тока.

Для визуализации газокапельного течения, создаваемого форсункой, используется оптическая схема, представленная на рисунке 1. Она состоит из яркого источника света (люминесцентный светодиод 3 Вт) (15), собирающей линзы большой апертуры (16), скоростной цифровой монохромной видеокамеры (17). Все указанные элементы оптической схемы закреплены неподвижно

но друг относительно друга с помощью алюминиевого профиля, который в свою очередь закреплен на механизме, позволяющем перемещать всю систему в трех направлениях пространства. Скоростная видеокамера снимала со скоростью 1700 кадров в секунду при разрешении 1 мегапиксель и при экспозиции кадров 2 мкс. На запускающий вход видеокамеры подавался сигнал с генератора (11).

При запуске генератора (11) происходила отправка TTL-импульсов на полупроводниковый ключ (10) в количестве N (варьировалось от 100 до 5000) и с частотой следования f (варьировалось от 100 Гц до 20 кГц). С другого выхода генератора (11) отправлялся запускающий видеосъемку сигнал на видеокамеру. Параметры N и f задавались таким образом, что $N/f < 3$ секунд, последнее значение является максимально возможной длительностью видеозаписи. Таким образом, первая половина видеозаписи соответствует течению с инициированием искрового разряда вблизи выходного отверстия форсунки, а вторая часть — случаю без разряда.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование влияния искрового разряда на угол раскрытия факела вихревой форсунки проведено при фиксированных параметрах, указанных выше, и при варьировании частоты f разрядов: $f = (100, 200, 500, 1000, 2000, 3333, 5000, 10000, 20000)$ Гц.

На рисунке 2 приведен общий вид процесса образования факела при работе разряда с частотой 2 кГц. В промежутке между высоковольтным электродом и выходным отверстием форсунки виден светящийся канал разряда длиной 1–2 мм. Важно отметить, что канал сосредоточен внутри (либо преимущественно внутри) внутренней поверхности пленки, что подтверждается совокупностью снимков, на которых также виден разрядный канал. Количество таких снимков меньше по сравнению с общим числом разрядов, т.к. частоты фотосъемки и разрядов не кратны друг другу, а экспозиция кадра существенно меньше периода съемки. Капли, видимые на горизонтальном участке электрода (8), образующиеся во время работы, не влияют на процесс распада пленки на капли и на процесс инициирования электрического разряда.

На рисунке 3 представлено сравнение конуса распыла в отсутствие разряда (а) и при частоте 10 кГц (б). Изображения получены в результате осреднения порядка 1000 кадров для каждого из двух случаев — без и с разрядом, средствами языка программирования Python с использованием библиотек OpenCV [22] и NumPy [23]. Для наглядности изображения повернуты так, чтобы ось отверстия форсунки стала горизонтальной, а одно из изображений отражено относительно вертикальной оси. Также на рисунках показано направление поля тяжести $\vec{g}$. На изображениях хорошо видны изменения угла конуса распыла и размеров темной области, занимаемой пленкой жидкости вблизи выходного отверстия. Высота данной области вдоль оси форсунки говорит о средней высоте пленки жидкости во время работы: абсолютные значения высоты будут зависеть от выбранной освещенности и настроек палитры рисунка, однако относительное изменение в меньшей степени зависит от этих настроек и показывает примерно двукратное сокращение высоты.

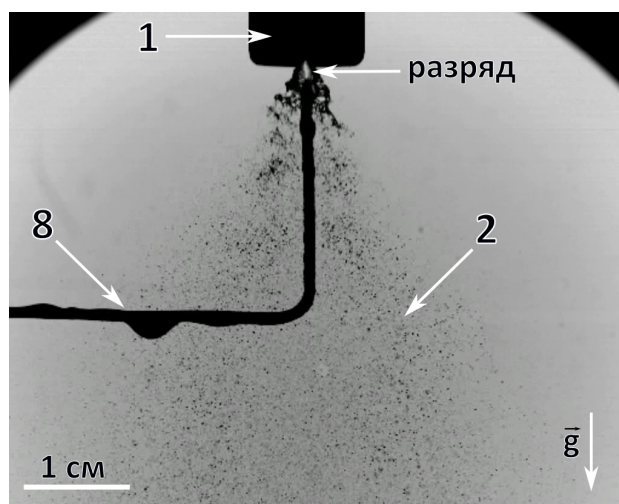


Рисунок 2. Общий вид факела (2) форсунки (1) с высоковольтным электродом (8) во время работы при частоте искрового разряда 2 кГц.

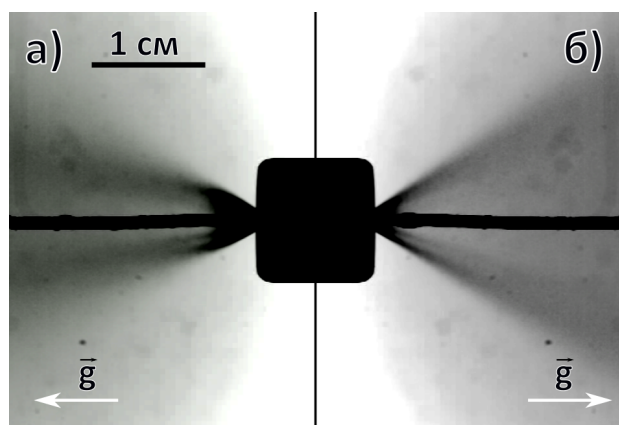


Рисунок 3. Результат осреднения изображений факела распыла. а) — без воздействия искровым разрядом, б) — при частоте разряда $f = 10$ кГц. Увеличение угла на 20° на расстоянии 11.5 мм от выходного отверстия.

Для количественного определения изменения угла раскрытия факела проводился анализ сечения изображения плоскостью, перпендикулярной оси форсунки и пересекающей ее на расстоянии 11.5 мм от выходного отверстия, достаточно большом для уменьшения погрешности измерений, но при котором граница факела еще хорошо различима на фоне подсветки. Ширина H в этом сечении определялась по координатам на изображении, в которых регистрируемая интенсивность составляла величину, равную среднему арифметическому от интенсивности фоновой подсветки в месте, где капли не наблюдаются, и минимального значения интенсивности внутри конуса распыла. Такой анализ распределения интенсивности выполнялся на прямой, перпендикулярной оси форсунки и находящейся на расстоянии 11.5 мм от нее. На рисунке 4 представлен график зависимости полной ширины факела H на расстоянии 11.5 мм от среза сопла от частоты f следования искровых разрядов. Кривая 1 соответствует случаю без разряда и подтверждает стабильность работы форсунки с течением времени эксперимента: разброс значений укла-

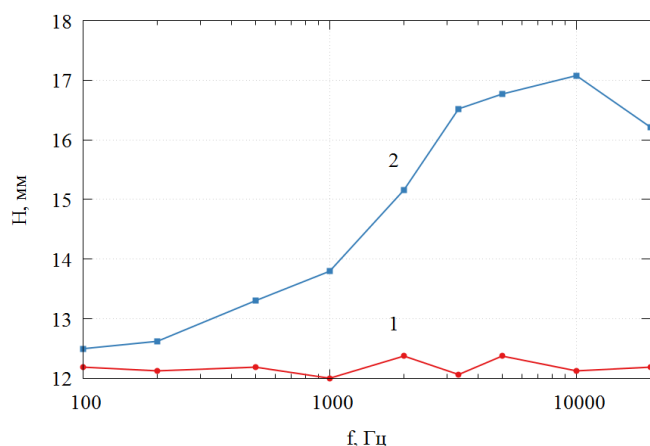


Рисунок 4. График зависимости полной ширины H конуса распыла на расстоянии 11.5 мм от выходного отверстия форсунки от частоты f следования искровых разрядов. Кривая 1 — контрольное измерение ширины в отсутствие напряжения в начале каждого эксперимента с новым значением f . Кривая 2 — зависимость $H(f)$ с включенным разрядом.

дывается в 0.5 мм на фоне общей ширины в 12 мм (4%). Кривая 2 соответствует случаю с включенным разрядом и демонстрирует максимум при частоте 10 кГц. При этом основной рост (до 90% от максимума) приходится на диапазон до 3 кГц. Наиболее вероятное объяснение данного явления состоит в соотношении между периодом следования разрядов (T_1) и временем роста пленки жидкости (T_2) вблизи выходного отверстия форсунки до начала ее распада на лигаменты и капли: при $T_1 \gg T_2$ ($100 < f < 1000$) эффект искрового воздействия выражен слабо, т.к. большую часть времени воздействие волн сжатия на пленку жидкости отсутствует; при $T_1 \sim T_2$ ($1000 < f < 5000$) разряд воздействует на максимальную площадь пленки и всю расходующую через форсунку жидкость; при $T_1 < T_2$ ($5000 < f < 10000$) площадь пленки сокращается, но еще возможно увеличение передаваемого импульса давления; при $T_1 \ll T_2$ ($f > 10000$) пленка жидкости не успевает удлиниться, разряд воздействует только на часть вблизи выходного отверстия, где ее толщина слишком велика для распада.

На рисунке 5 представлены характерные осциллограммы напряжения U и тока I одной из последовательностей разрядов в эксперименте с $f = 10$ кГц. Заметное протекание тока начинается на фронте нарастания импульса при напряжении, меньшим по сравнению с установленным на источнике. Форма осциллограмм определяется электрическими параметрами цепи (емкость, индуктивность, сопротивление), а стационарное значение напряжения во время горения искры (длительность открытого состояния ключа 10 мкс) около 500 В определяется сопротивлением балластного резистора. Оценочное значение энергии на этапе формирования искры от -0.15 мкс до $+0.4$ мкс, когда газ, расширяясь, формирует волну сжатия, составляет величину порядка 1 мДж.

4. ВЫВОДЫ

Проведено исследование зависимости полного угла раскрытия факела вихревой форсунки от частоты следования искровых разрядов, инициируемых между

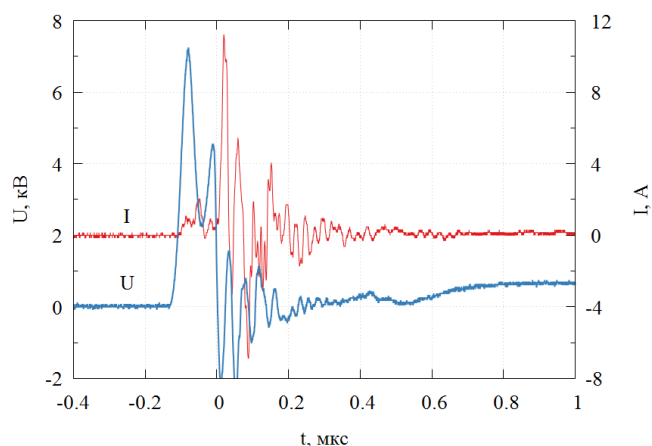


Рисунок 5. Осциллограммы напряжения U и тока I одной из последовательностей разрядов в эксперименте с $f = 10$ кГц.

выходным отверстием форсунки и дополнительным внешним электродом, расположенным на ее оси симметрии внутри пленки жидкости. Показан немонотонный ход полученной зависимости с локальным максимумом, который достигается при 10 кГц в исследованном диапазоне частот. Полный угол раскрытия факела вблизи выходного отверстия форсунки (на расстоянии 11.5 мм) увеличился на 20° с 45° до 65° (+45%) при этой частоте по сравнению с работой без разряда. Наличие максимума в зависимости связано с соотношением между периодом следования разрядов и временем формирования пленки жидкости у выходного отверстия форсунки. Анализ осциллограмм тока и напряжения искрового разряда показывает, что усредненная по времени мощность, выделяемая в межэлектродном промежутке, значительно меньше мощности, затраченной на создание газокапельного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rayleigh L 1878 *Proceedings of the London Mathematical Society* **s1-10** 4–13
2. Tyler E 1933 *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **16** 504–518
3. Lefebvre A H and McDonell V G 2017 *Atomization and Sprays* (Boca Raton: CRC Press)
4. Ashgriz N (ed) 2011 *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* (New York: Springer US)
5. Lozano A, Call C J and Dopazo C 2023 An experimental and numerical study of the atomization of a planar liquid sheet *Proceedings of the Sixth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (Begellhouse) pp 24–31
6. Carvalho I, Heitor M and Santos D 2002 *International Journal of Multiphase Flow* **28** 773–789
7. Faeth G 1987 *Progress in Energy and Combustion Science* **13** 293–345
8. Taylor G 1959 *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **253** 313–321
9. Vasilyev A Y, Domrina E S, Kaufman S V and Maiorova A I 2019 *Journal of Physics: Conference Series* **1359** 012131
10. Gong J, Fan W and Peng J 2019 *International Journal of Precision Agricultural Aviation* **2** 26–30
11. Inoue C, Watanabe T and Himeno T 2009 Liquid sheet dynamics and primary breakup characteristics at impingement type injector *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* pp AIAA 2009–5041
12. Zhao L E, Moiz A A, Naber J, Lee S Y, Barros S and Atkinson W 2015 High-speed spray-to-spray collision study on two-hole impinging jet nozzles *SAE Technical Paper Series (ANNUAL vol 1)* (SAE International) pp 2015–01–0948
13. Wang P and Yang W 2023 *Advances in Mechanical Engineering* **15** 16878132231195016
14. Kudryashova O, Shalunov A, Genne D, Dorovskikh R and Titov S 2023 *Applied Sciences* **13** 12330
15. Dighe S and Gadgil H 2019 *Journal of Fluid Mechanics* **880** 653–683
16. Dighe S L and Gadgil H P 2020 Effect of transverse acoustic perturbation on the liquid sheet breakup *AIAA Scitech 2020 Forum* (American Institute of Aeronautics and Astronautics) pp AIAA 2020–2283
17. Dighe S and Gadgil H 2022 *International Journal of Multiphase Flow* **156** 104226
18. Mulmule A S, Tirumkudulu M, Ananthkrishnan N and Ramamurthy K 2007 Liquid sheet instability in the presence of acoustic forcing *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* (American Institute of Aeronautics and Astronautics) pp AIAA 2007–5688
19. Aravind I B, Bhattacharjee R R and Chakravarthy S R 2021 *International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS)* **1** 399
20. Савельев А С и Угрюмов А В 2024 *Прикладная физика* **5** 33–39
21. Савельев А С, Куликов Ю М и Панов В А 2025 *Вестник ОИВТ РАН* **17** 7–10
22. Библиотека opencv для python, v. 4.12.0 URL <https://opencv.org/>
23. Библиотека numpy для python, v. 2.3.0 URL <https://numpy.org/>