

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В ПРИСУТСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

© 2023 г. А. С. Савельев^{а,*}

^а Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*e-mail: fisteh@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Экспериментально исследовано взаимное воздействие друг на друга электрического разряда и воздушно-капельного потока, формируемого центробежной форсункой при подаче на нее проводящей жидкости (раствор поваренной соли в воде) под давлением. С помощью метода цифрового двойного микрофотографирования с дальнейшей компьютерной обработкой фотографий получены основные характеристики распыла в присутствии электрического разряда и без него: средний диаметр, средний объемно-поверхностный диаметр, распределение компонент вектора скорости по величине диаметра капель и другие. Показано, что наличие распыла жидкости приводит к уменьшению эффективной величины пробойной напряженности электрического поля. В свою очередь обнаружено, что энерговыделение в воздушно-капельный поток приводит к изменению величины среднего объемно-поверхностного диаметра, а наличие высокого напряжения в области измерения приводит к ускорению капель относительно малого диаметра.

Ключевые слова: электрический разряд, газокapельный поток

DOI: 10.31857/S0367292123600231, **EDN:** VFJEAA

1. ВВЕДЕНИЕ

Явления, связанные с электрическим разрядом в диспергированной среде, исследуются относительно давно (см., например, [1]), применения же на практике технологий, связанных с такими явлениями, известны относительно недавно. К примеру, явление формирования капельной струи в сильном электрическом поле используется в масс-спектрометрии, а также в коллоидных (электростатических) двигателях, используемых на искусственных спутниках Земли. Инициирование электрического разряда исследуется не только в газокapельной среде, но также и в пузырьковой среде, в которой присутствие газовой фазы меняет процесс формирования электрического разряда [2, 3]. Использование так называемых спрей-разрядов открывает некоторые возможности для технологического применения в области плазмохимии, технологиях обеззараживания и очистки. Одна из идей заключается в том, чтобы доставить в область плазмы те химические компоненты, вещества, соединения, которые при условиях, близких к нормальным, находятся не в газовой фазе, а в виде жидкости или в растворе жидкости. При пропускании электрического тока через область, занятую газокapельной средой на основе воды,

спирта, могут быть получены некоторые соединения, такие как перекись водорода [4–6], водород [4], при этом эффективность такой конверсии может достигать 50% [5]. В работе [7] на основе такого разряда предложено производить очистку городского воздуха без производства озона.

Целью данной работы является исследование вопроса о создании спрей-разряда и взаимного влияния разряда и газокapельной среды. На данном этапе работы основными задачами являются определение оптимальной схемы создания разряда, удобной для исследований, а также исследование воздействия разряда на процесс формирования распыла.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. Способ создания газокapельного потока

Для создания газокapельного потока применялась центробежная форсунка по типу той, что используется в распылителях многих современных лекарственных, косметических средств или средств бытовой химии. Такие распылители обычно (как и в данном случае) являются форсунками центробежного типа, когда вода под давлением выше атмосферного подается в отверстие диаметром менее миллиметра со значительной

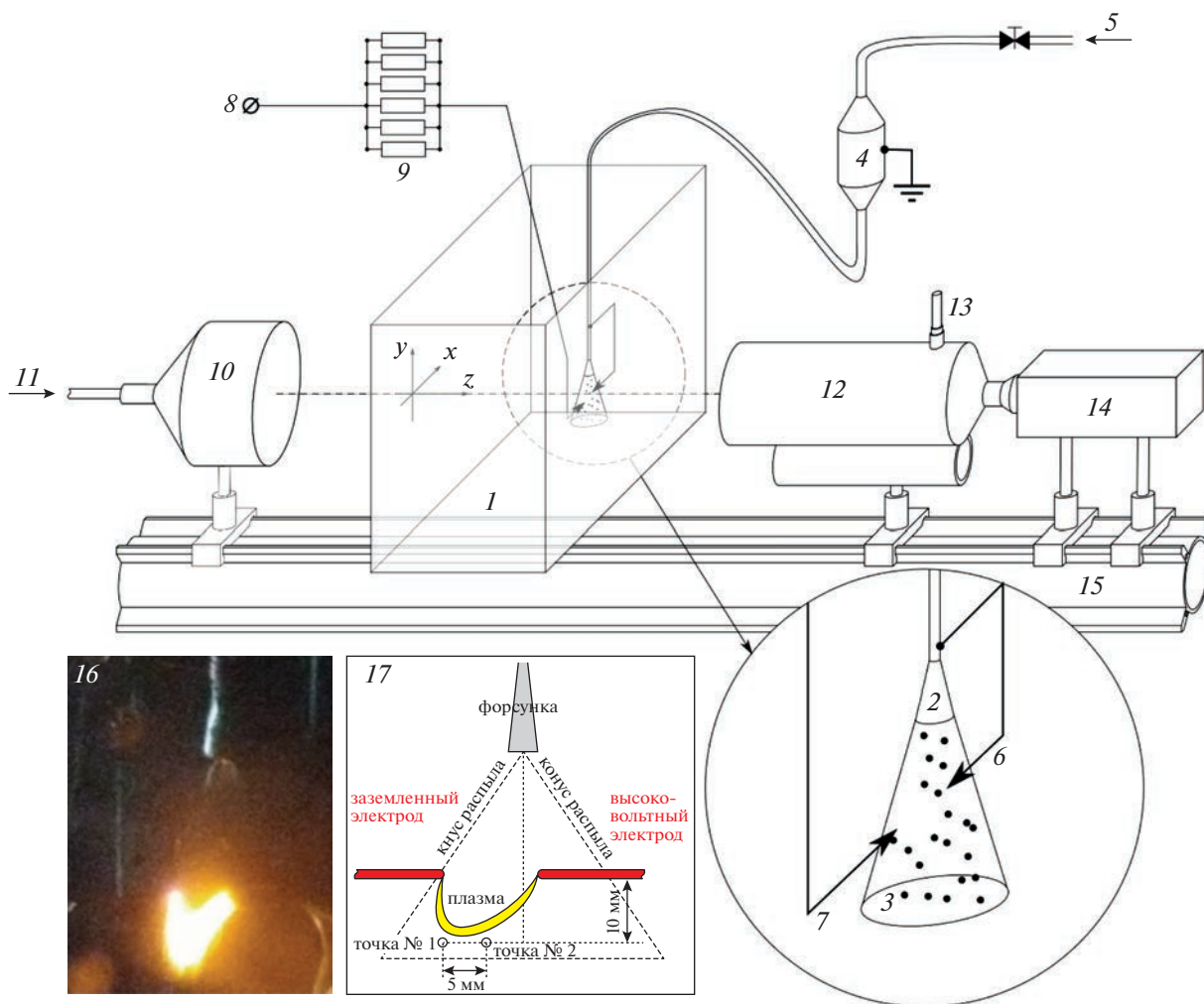


Рис. 1. Схема инициирования разряда в газокapельной среде и оптическая схема измерения параметров распыла: 1 – прозрачная емкость, 2 – форсунка, 3 – распыл, 4 – емкость для воды, 5 – сжатый воздух, 6 – заземленный электрод, 7 – высоковольтный электрод, 8 – подключение высокого напряжения, 9 – балластный резистор, 10 – диффузор, 11 – лазерное излучение, 12 – микроскоп, 13 – подсветка места фокусировки, 14 – видеокамера, 15 – оптический рельс, 16 – фотография разряда при наличии распыла воды, 17 – схема выбора точек диагностики распыла.

закруткой, благодаря чему струя жидкости быстро распадается на мелкие капли с максимумом вероятности в распределении диаметра капель порядка нескольких десятков микрометров. Данный тип форсунок выбран из следующих соображений: 1) для создания распыла не требуется наличие дополнительных воздушных потоков (как, например, в случае струйных форсунок), 2) распыл формируется на относительно коротком расстоянии, что позволяет разместить форсунку в рабочей камере относительно малых размеров, как сделано в данной работе.

Дистиллированная вода, к которой добавлялась поваренная соль для повышения проводимости, подавалась под давлением на форсунку (см. 2 на рис. 1). Давление воды обеспечивалось с помощью магистрали высокого давления – 5,

которая через газовый кран соединялась с емкостью – 4 из нержавеющей стали. Благодаря вытеснению воды из емкости с помощью воздуха, сжатого до давления известной величины, обеспечивался практически непрерывный процесс распыливания жидкости. Распыл жидкости происходил в закрытой емкости – 1 размерами $40 \times 60 \times 100 \text{ см}^3$ из оргстекла, что позволяло наблюдать разряд, проводить его фотосъемку и измерения свойств распыла через прозрачные стенки емкости.

2.2. Схема инициирования электрического разряда

На рис. 1, в том числе, представлена электрическая схема для инициирования разряда в газокapельной среде. Два электрода (6 и 7) из медной

проволоки диаметром 1 мм располагались навстречу друг другу так, чтобы отрезок межэлектродного зазора приходился практически на центр распыла жидкости, а размер межэлектродного зазора составлял 1 см. Один из электродов соединяется с хорошо проводящей (металлической) поверхностью форсунки 2, а второй электрод — с положительным электродом высоковольтного источника питания 8 через набор балластных резисторов 9. Измерение тока в цепи и выходного напряжения источника Spellman происходило по его цифровым индикаторам.

Балластный резистор собран из нескольких (пяти) резисторов КЭВ-10 сопротивлением 4.7 МОм и мощностью 10 Вт каждый, подключенных параллельно друг другу. При этом измеренная величина результирующего сопротивления составила 0.86 МОм. При указанных параметрах суммарная мощность балластного резистора превышала электрическую мощность примерно в два раза для любых возможных значений тока разряда. Количество соединенных параллельно резисторов определяло максимально возможный ток разряда (около 20 мА), но в эксперименте максимальный ток разряда не поднимался выше 8 мА.

Для того, чтобы увеличить энерговклад в разряд, следует увеличить проводимость жидкости. В экспериментах в воду добавлялась поваренная соль NaCl в количестве примерно 5 г на 1 л, что в итоге приводило к росту проводимости, и ее величина соответствовала примерно 200 Ом · см в этом случае. На рис. 1 (16) видно, что цвет разряда имеет желтый оттенок, что свидетельствует о наличии натрия в области существования плазмы. При использовании описанного выше водного раствора соли удалось увеличить ток разряда до 8 мА постоянно и 10 мА кратковременно. При этом падение напряжения на межэлектродном промежутке составляло величину порядка нескольких киловольт.

Как показал опыт, вследствие электрического разряда в атмосфере рабочей камеры генерируется озон и окислы азота, что свидетельствует о неравновесной плазме, в которой под действием сильно электрического поля генерируется радикалы и другие химически активные компоненты.

Наконец необходимо отметить, что при отсутствии распыла жидкости в области между электродами разряд не происходит, так как эффективная напряженность электрического поля оказывается меньше пробойной величины для воздуха. То есть наличие распыла (даже в случае слабопроводящей жидкости, воды без добавления соли) облегчает зажигание разряда.

2.3. Измерение характеристик распыла

Для измерения свойств распыла использовалась лазерная система диагностики (см. рис. 1), состоящая из:

- двойного Nd:YAG лазера 532 нм с модуляцией добротности, снабженного оптическим преобразователем (10) на красителе родамин 6G, преобразующим когерентное излучение лазера (11) в некогерентную фоновую подсветку распыла;

- цифровой видеокамеры (14) с возможностью двойной экспозиции и микроскопа (12) с большим рабочим расстоянием в качестве объектива к этой видеокамере;

- персонального компьютера, в состав которого включены устройства синхронизации аппаратуры, системы сбора, обработки цифровых микрофотографий распыла жидкости, а также установленное программное обеспечение для определения параметров распыла.

Система диагностики способна производить измерения следующих параметров капельного распыла: распределение относительного количества капель по диаметру ($R(D)$), распределения двух компонент вектора усредненной скорости капель одинакового диаметра ($V_x(D)$, $V_y(D)$). На основе полученных данных рассчитываются другие параметры, такие как: средний диаметр капли D_{10} , средний объемно-поверхностный диаметр по Заутеру (D_{32}), среднеквадратичное отклонение диаметров капель от среднего диаметра ($\text{rms}(D)$), распределение средней скорости капель одного диаметра $V(D)$ и другие параметры. Принцип измерения параметров распыла заключается в многократном получении двойных теневых микрофотографий капель с последующей их обработкой с помощью компьютера. Используемая система позволяет работать с максимальной частотой 14 Гц, что при длительности существования стационарного распыла в несколько минут позволяет получать несколько тысяч двойных теневых микрофотографий. После обработки этих фотографий получается распределение параметров по диаметру, в котором участвуют несколько тысяч капель. Параметры капель (положение на кадре, диаметр) определяются непосредственно при цифровой обработке фотографий. Поскольку фотографии получены с применением двойной подсветки лазером и с применением видеокамеры с двойной экспозицией, за счет определения координат капли на первой и второй фотографии (полученных с относительно короткой задержкой) удастся определить величины компонент ее скорости. Следует отметить, что фотографии можно считать мгновенными, так как применяется лазер с модуляцией добротности, что обеспечивает длительность свечения в несколько наносекунд. В работах [8, 9] более подробно описаны

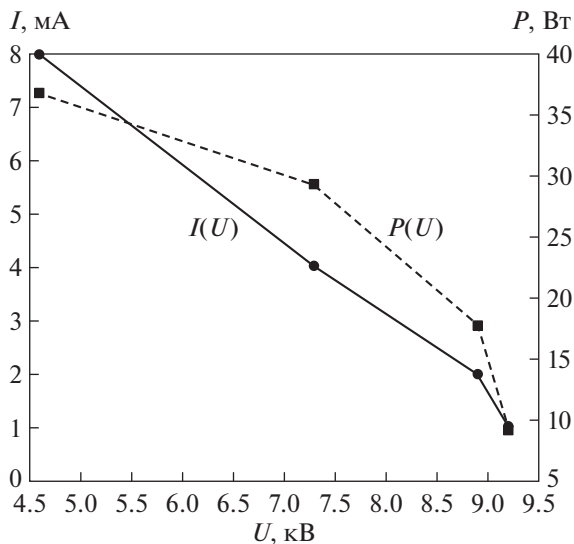


Рис. 2. Зависимость тока разряда I и мощности P , вкладываемой в разряд, от разности потенциалов U между электродами.

способы получения и обработки микрофотографий распыла жидкости.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ

3.1. Электрические параметры разряда

При наличии распыла проводящей жидкости между электродами пробойное напряжение между ними уменьшалось. Ранее было отмечено, что расстояние между электродами составляло величину 1 см, при этом разряда между электродами не происходило при подаче высокого напряжения величиной 15 кВ, которая являлась максимальным выходным напряжением источника напряжения. При распыле жидкости в межэлектродное пространство возникал электрический разряд, причем падение напряжения между электродами составляло величину менее 10 кВ. На рис. 2 представлены зависимости тока разряда I и мощности P , вкладываемой в разряд, от напряжения U между электродами, которое вычислялось как разность между выходным напряжением высоковольтного источника питания и падением напряжения на балластном резисторе.

3.2. Характеристики распыла в присутствии электрического разряда

При подаче жидкости под давлением на форсунку формировались распыл и электрический разряд между электродами. Канал разряда представлял собой искривленную структуру, причем это искривление происходило в сторону направления движения капель (см. рис. 1). Как извест-

но, при распылении жидкости через центробежную форсунку происходит формирование так называемого конуса распыла, где на поверхности конуса с вершиной вблизи выходного отверстия форсунки находится максимум концентрации капель, а скорость этих капель максимальна. На представленной выше фотографии разряда (см. рис. 1) видно, что плазма разряда имеет вытянутую форму, при этом наибольшую вытянутость плазма имеет в области вблизи заземленного электрода, где концентрация капель распыла, как представляется, оказывается наибольшей. А в области вблизи высоковольтного электрода плазменный шнур имеет наименьшую вытянутость в направлении движения капель. Такая форма разряда, конечно, не может быть объяснена распределением напряженности электрического поля. В связи с этим было принято решение провести измерение свойств распыла в центре межэлектродного промежутка, но на некотором расстоянии от него в направлении движения капель. Эта точка далее будет называться “точка № 1”. Вторая точка выбрана в области ближе к заземленному электроду (“точка № 2”). Расстояние между точками равно 5 мм, а расстояние от отрезка межэлектродного зазора, длина которого равна 1 см, до точек равно 1 см. Важно отметить, что данные точки лежат ниже по направлению движения капель относительно положения плазмы разряда. В эксперименте измерения параметров распыла проводились с электрическим разрядом и без него, а также варьировался ток разряда. Другие параметры (такие как расход воды, конфигурация электродов, положение форсунки относительно межэлектродного зазора) не менялись.

На рис. 3б представлена характерная гистограмма распределения капель по диаметрам $R(D)$, где R — доля (в %) капель, диаметр которых лежит в выбранном диапазоне, а на рис. 4 — распределения величины скорости капли по диаметрам $V(D)$, где V — средняя скорость капель диаметра D , и доля капель $N/N_0(D)$ выбранного диаметра D , обнаруженных при обработке двойных микрофотографий по положениям которых определена скорость V . Можно утверждать, что форма кривой $N/N_0(D)$ повторяет кривую $R(D)$, но не в точности, так как обнаруженная на первой части микрофотографии капля может быть не обнаружена на второй части. Причиной этому может быть то обстоятельство, что капля на первой части микрофотографии находится вблизи ее края, а на второй части — уже не видна, так как вышла за пределы видимости микроскопа. Вертикальная погрешность на графике скорости (рис. 4) является среднеквадратичным отклонением от средней величины для выбранного диапазона диаметра D . На всех гистограммах, представленных в данной работе, ширина диапазона диаметра составляла 1 мкм.

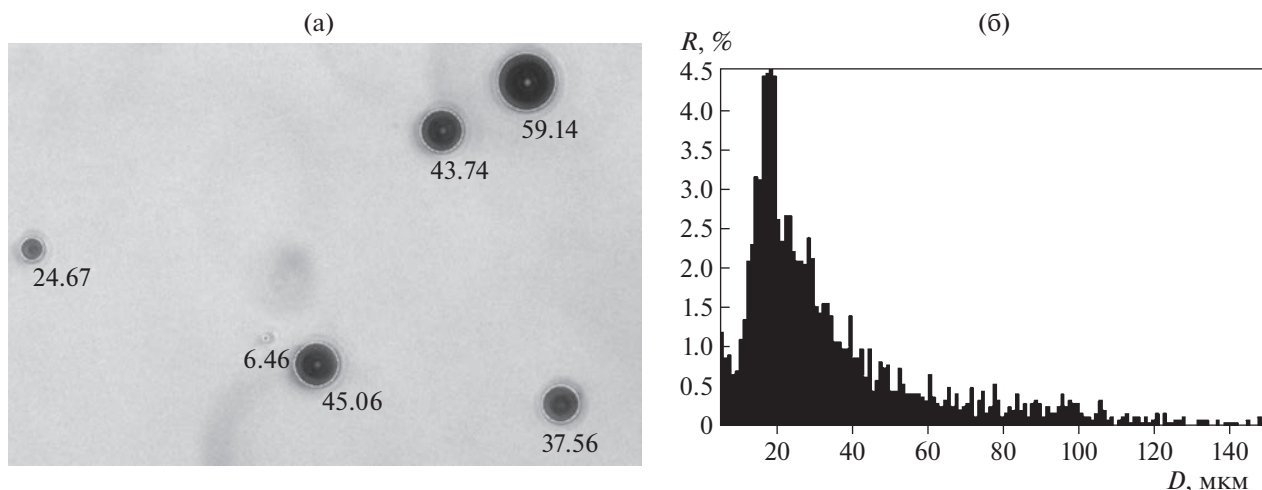


Рис. 3. Пример части обработанной теневой микрофотографии (а), на которой в микрометрах указаны диаметры найденных капель, и характерная гистограмма распределения величины диаметра $R(D)$ для исследуемого распыла жидкости (б).

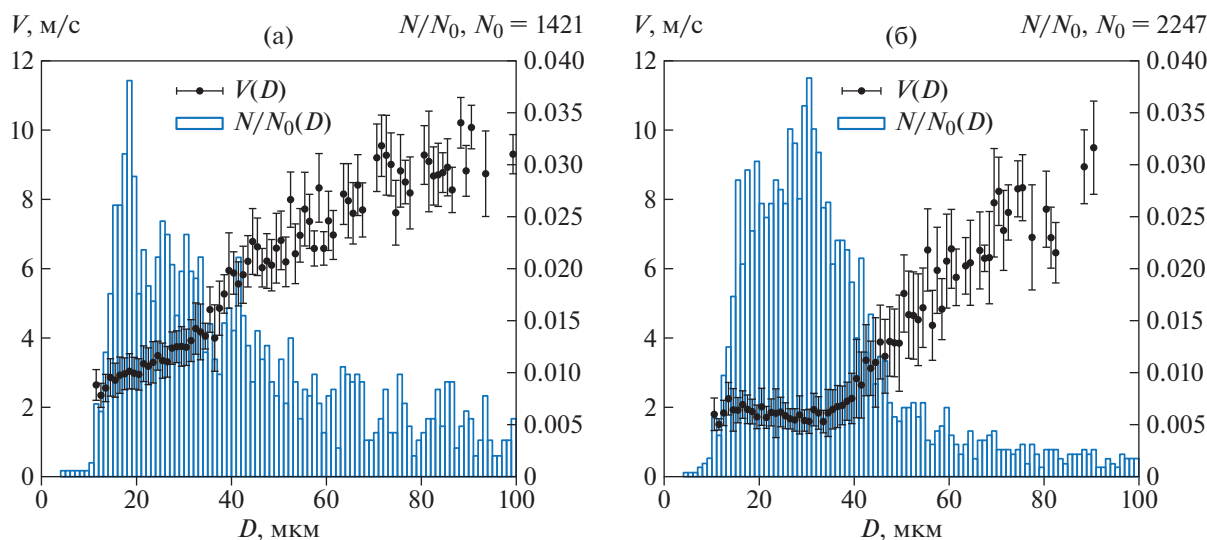


Рис. 4. Один из результатов измерения распределения величины скорости капель от диаметра $V(D)$, а также доля капель N/N_0 выбранного диаметра D , участвующих в определении скорости: без разряда (а), с разрядом (б).

Помимо обозначенных выше параметров с помощью данных гистограмм можно отметить наиболее вероятное появление капель на теневых микрофотографиях ($D(R_{\max})$), рассчитать средний диаметр капель D_{10} , средний объемно-поверхностный диаметр D_{32} , среднюю скорость всех капель $\langle V \rangle$, среднеквадратичное отклонение $\text{rms}(V)$ величины скорости капли от средней величины, количество капель N_0 , обнаруженных при обработке фотографий. Поскольку данные гистограммы являются характерными, то можно отметить несколько свойств распыла в целом:

- диаметр капель распыла лежит в диапазоне до 100 мкм;
- наибольшее количество капель имеют диаметр 19–20 мкм;
- количество капель с диаметром менее 5 мкм значительно вследствие соударения первичных капель большего диаметра со стенками емкости;
- капли больших диаметров имеют большую скорость, так как сила сопротивления (торможения, сила Стокса) пропорциональна диаметру, а запасенная кинетическая энергия капли — третьей степени.

Таблица 1. Результаты измерений свойств распыла с разрядом и без него ($I = 0$)

Точка	I , мА	U_{PSU} , кВ	P , Вт	N_0	D_{10} , мкм	D_{32} , мкм	$\text{rms}(D)$, мкм	$\langle V \rangle$, м/с	$\text{rms}(V)$, м/с	$D(R_{\text{max}})$, мкм
№ 1	0.0	0.0	0	3144	36.50	86.46	26.77	2.65	1.59	19–20
	8.0	11.0	34	2802	40.64	101.96	33.72	3.35	1.64	19–20
	4.0	10.5	29	3034	37.63	104.65	32.62	3.65	1.77	16–20
	2.0	10.5	18	2723	42.14	106.26	33.71	4.11	1.30	18–19
	1.0 ^а	10.0	9	2445	37.23	103.32	30.53	3.32	1.18	18–19
№ 2	0.0	0.0	0.0	3864	34.28	86.20	26.68	2.99	1.45	19–20
	8.0	11.0	34	2137	38.75	90.13	30.80	3.1	1.85	19–20
	4.0	10.5	29	2592	42.40	98.04	34.22	4.38	1.80	16–20
	2.0	10.5	18	2464	44.63	98.42	36.41	4.90	1.80	18–19
	1.0 ^б	10.0	9	2348	45.21	103.85	36.88	4.80	1.60	19–20
	0.0 ^в	0.0	0.0	3467	34.54	87.00	28.42	2.89	1.42	19–20

^а Часть данных представлена на рис. 3б.^б Часть данных представлена на рис. 4б.^в Часть данных представлена на рис. 4а.

В табл. 1 представлены результаты измерений электрических параметров разряда и свойств распыла. Видно, что наличие плазмы практически никак не влияет на размеры капель и их количество, однако наличие сильного электрического поля приводит к заметному ускорению капель. Следует уточнить, что электрические параметры: ток I , напряжение на выходе источника (U_{PSU}), энерговыход в разряд – это фактически усредненные по времени параметры. Высоковольтный источник работал в режиме источника постоянного (заданного) тока, а выходное напряжение U_{PSU} определялось величиной I . В таблице использованы следующие обозначения: I – ток электрического разряда, U_{PSU} – выходное напряжение источника высокого напряжения, P – электрическая мощность разряда, N_0 – количество капель, которые удалось обнаружить на фотографиях в эксперименте, D_{10} – средний диаметр, вычисленный как сумма диаметров капель, деленная на N_0

$$D_{10} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{D_i}{N_0},$$

где i – номер капли, D_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр, равный сумме третьей степени диаметров капель, деленной на сумму второй степени диаметров капель

$$D_{32} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{D_i^3}{D_i^2},$$

$\text{rms}(D)$ – среднеквадратичное отклонение диаметров капель от средней величины D_{10} :

$$\text{rms}(D) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_0} (D_{10} - D_i)^2}{N_0}},$$

$\langle V \rangle$ – средняя скорость капель, равная сумме скоростей капель, деленной на N_1 :

$$\langle V \rangle = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{V_i}{N_1},$$

где N_1 – количество капель, обнаруженных на обеих частях двойных теневых микрофотографий (как сказано выше), $\text{rms}(V)$ – среднеквадратичное отклонение скорости капель от средней величины $\langle V \rangle$

$$\text{rms}(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (\langle V \rangle - V_i)^2}{N_1}},$$

$D(R_{\text{max}})$ – наиболее вероятное значение диаметра капли (см. максимум гистограммы на рис. 3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Следует обратить внимание на повторяемость экспериментальных измерений: для точки № 2 проведено дважды измерение свойств распыла при отсутствии разряда (см. табл. 1). При этом многие параметры (средние диаметры, количество капель, скорости и т. п.) остаются такими же. Следует отметить, что строки в табл. 1 следуют в

“хронологическом” порядке, т.е. измерения происходили в такой же последовательности, и строки для точки № 2, соответствующие экспериментам без разряда ($I = 0$), разделены серией экспериментов с иницированием разряда при различных его токах. Из этого можно заключить, что иницирование разряда не воздействует на конструкцию и схему эксперимента, а изменения параметров распыла не являются случайными флуктуациями или погрешностями эксперимента.

Кроме того, при сравнении всех трех строк, у которых $I = 0$ (т. е. данные экспериментов без электрического разряда), оказывается, что многие параметры (такие как скорость, средние диаметры D_{10} и D_{32} и другие) оказываются близкими друг к другу. Это свидетельствует о том, что в местах измерений параметров (примерно на расстоянии 5 см от форсунки) распыл оказывается одинаковым. Но при включении электрического разряда происходит заметное изменение величины среднего диаметра D_{32} и средней скорости $\langle V \rangle$.

В эксперименте мощность, вкладываемая в разрядный промежуток, не превышала 35 Вт. Если предположить, что вся эта мощность идет на нагрев воды из форсунки, то в среднем температура воды поднимется на 5°C . Если уточнить, что энерговклад происходит локально, и воздействию нагрева подвержена только часть воды, то все равно не следует ожидать значительных величин нагрева и скорости испарения воды. Тем не менее при сравнении гистограмм на рис. 4 видно, что доля капель относительно большого диаметра оказывается больше в случае иницирования разряда. Этот же эффект виден по данным табл. 1, где значение среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} оказывается больше, когда разряд существует.

Иницирование электрического разряда в области распыла сопряжено с двумя обстоятельствами: это нагрев газокapельного потока за счет проводимости среды и наличие относительно высокой напряженности электрического поля. Первое обстоятельство приводит к нагреву и испарению капelь, причем очевидно, что скорость испарения (точнее скорость уменьшения диаметра) капelи будет тем больше, чем меньше ее диаметр. На рис. 4 видно, что доля капelь относительно небольшого диаметра остается такой же, но максимум на гистограмме при включении разряда уменьшается до значения менее 20 мкм, хотя до этого был около 30 мкм. Капelи, которые имели до включения разряда диаметр, близкий к 5 мкм (это является нижним пределом диапазона измерения диаметров капelь для лазерной системы диагностики), выбывают из статистики, так как после включения разряда их диаметр уменьшается настолько, что они не могут быть определены на тепловых микрофотографиях. Капelи еще меньшего

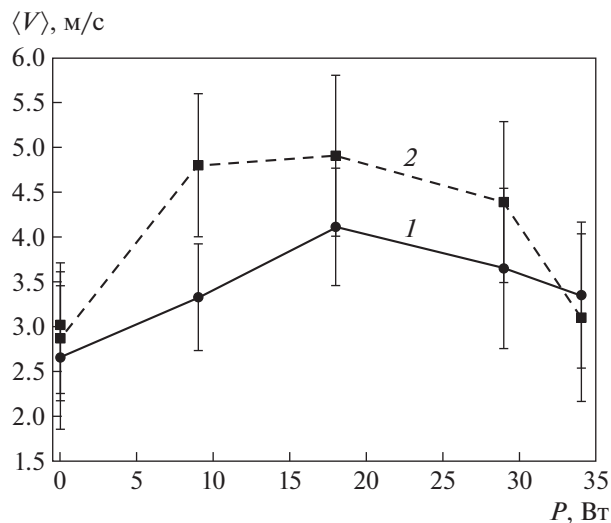


Рис. 5. Зависимость средней скорости распыла от выделяемой в разряде мощности P . Вертикальные погрешности на графике соответствуют среднеквадратичному отклонению от средней величины $\langle V \rangle$.

диаметра могут полностью испариться. Из-за этого доля капelь относительно большого диаметра в статистике возрастает, что, очевидно, приводит к увеличению среднего диаметра D_{32} , при этом средний диаметр D_{10} меняется незначительно.

Наличие высокого напряжения в области распыла приводит к дополнительному ускорению капelь, при этом следует ожидать, что воздействие электрического поля будет больше (с точки зрения ускорения) на те капelи, у которых диаметр меньше. Данное обстоятельство просматривается в примере на гистограммах рис. 4: для капelь диаметром менее 40 мкм заметно растет скорость, при этом для капelь относительно большого диаметра практически не происходит изменений скорости после включения разряда. При этом максимальный эффект увеличения средней скорости капelь распыла происходит не при максимальной мощности (см. рис. 5). Это обстоятельство можно объяснить зависимостью межэлектродного напряжения U от тока разряда I : при повышении тока (и, соответственно, выделяемой в разряде мощности P) напряжение между электродами падает (см. рис. 2), а значит ускоряющее действие поля снижается. При этом все же средняя скорость распыла оказывается больше, так как при повышении мощности увеличивается доля испаренных мелких (и медленных) капelь распыла, а значит при вычислении $\langle V \rangle$ наибольшее влияние окажут капelи большого диаметра, которые с одной стороны, менее интенсивно испаряются, а с другой — менее подвержены дей-

ствию ускоряющего поля за счет значительно большей инерции.

По всей видимости, не следует рассматривать процесс объединения капель из-за предполагаемых их столкновений, а также возможное его ускорение под действием электрического поля вот по какой причине. Одним из преимуществ метода двойного теневого микрофотографирования распыла (по сравнению, например, с методом Interferometric Mie Imaging, IMI, или Phase Doppler Anemometry, PDA) является возможность регистрировать форму капель. Для каждой строчки табл. 1 была получена примерно одна тысяча двойных теневых микрофотографий (см. пример на рис. 3а). Ширина видимой области 1 мм, средний диаметр несколько десятков микрометров, а среднее количество видимых капель на одну фотографию — единицы. Поэтому распределение капель по объему не следует считать плотным. Кроме того, ни на одной фотографии не зарегистрирована деформированная форма капель из-за возможного слияния капель.

5. ВЫВОДЫ

Выполнена разработка электрической схемы генерации электрического разряда в двухфазной среде (распыл проводящей жидкости), так называемого спрей-разряда. Получены условия генерации разряда (пробойное напряжение, сила тока, а также область формирования разряда в факеле распыла), при котором в области движения капель распыла наблюдаются плазменные процессы (свечение плазмы) нетермического характера, неравновесная плазма. Проведено исследование действия распыла на пробойные характеристики разрядного промежутка. Разработана экспериментальная установка, позволяющая генерировать электрический разряд в спрее (факеле распыла) и одновременно проводить фотографирование процесса, в том числе, теневое микрофотографирование. Проведено измерение характеристик распыла жидкости с целью определить воздействие разряда на параметры капель при различных усредненных по времени значениях энерговклада в среду. В результате выполнения исследования получено, что на свойства электрического разряда (спрей-разряда) оказывают влияние свойства распыла жидкости. При этом сам разряд в виду относительно невысокого энерговклада слабо влияет на параметры распыла, такие как средний диаметр или диаметр по Заутеру. Влияние капель жидкости приводит к снижению

величины пробойного напряжения. При этом форма плазмы оказывается вытянутой в направлении движения капель, что удлиняет путь, по которому течет ток, и соответственно растет энерговклад в разряд за счет увеличения сопротивления области, занятой плазмой. Следует отметить, что за счет увеличения напряженности электрического поля происходит рост скорости капель. Следует отметить два возможных механизма воздействия разряда на свойства распыла: ускорение мелких капель в области вблизи электродов и полное испарение мелких капель, так что более тяжелые капли начинают играть большую роль при расчете средних величин.

Что касается технологических применений, то на основе анализа литературы относительно данного явления следует отметить следующие:

- прямая наработка в неравновесной плазме соединений, которые обычно получают при высоких давлениях или температурах (например, перекись водорода);

- генерация активной воздушно-капельной среды для дезинфекции, в том числе, при наработке или активации стерилизующих компонентов, растворенных в газе (озон, окислы азота, хлор и его соединения) или воде (перекись водорода).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zeleny J.* // Phys. Rev. 1914. V. 3. P. 69.
2. *Panov V.A., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Pecherkin V.Ya., Saveliev A.S.* // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44 (9). P. 882.
3. *Panov V.A., Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., and Vetchinin S.P.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47 (6). P. 623.
4. *Burlica R., Shih K.-Y., Locke B.R.* // Industrial Eng. Chem. Res. 2010. V. 49. P. 6342.
5. *Fridman A.* Plasma Chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
6. *Burlica R., Finney W.C., Locke B.R.* // IEEE Trans. Ind. Appl. 2013. V. 49 (3). P. 1098.
7. *Tepper G., Kessick G., Pestov D.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 11330.
8. *Савельев А.С.* // Вестник ОИВТ РАН. 2019. Т. 2. С. 69.
9. *De Cock N., Massinon M., Lebeau F.* // Proc. Internat. Advances in Pesticide Application, Oxford, United Kingdom, 2014. P. 122.