ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2023, том 49, № 11, с. 1237–1246

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

УДК 537.52

ФОРМИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

© 2023 г. А. С. Савельев[a],*

[a]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

**e-mail: fisteh@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.07.2023 г.
После доработки 10.09.2023 г.
Принята к публикации 11.09.2023 г.

Исследовано взаимное воздействие электрического разряда и газокапельного потока проводящей жидкости, создаваемого форсункой центробежного типа. В эксперименте регистрировались электрические параметры разряда, а также проводилось измерение локальных характеристик распыла: распределения числа капель и компонент вектора их скорости по диаметру капель. Измерения проводились методом двойного теневого микрофотографирования. Исследовано влияние распыла проводящей жидкости на осредненные по времени электрические параметры разряда, а также изменение свойств распыла под действием высокого напряжения и тока. Дополнительно проведено измерение характеристик распыла при подаче высокого напряжения допробойной величины. Проведено скоростное фотографирование разряда в присутствии капель проводящей жидкости.

Ключевые слова: искровой разряд, газокапельный поток проводящей жидкости, аэрозоль

DOI: 10.31857/S0367292123600966, **EDN:** AGTPGU

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование электрического разряда в задачах производства химических соединений из веществ-реагентов представляет интерес с точки зрения промышленного применения. Примером могут служить процессы, приводящие к наработке ряда полезных веществ, включая генерирование озона с помощью электрического разряда в воздухе, наработка радикалов гидроксила OH, а также производство перекиси водорода в водной или влажной среде. Данные плазмохимические процессы могут быть применены, например, в задачах очистки и обеззараживания воды, применяемой в промышленности и в быту. При обработке воды с помощью электрического разряда в промышленной воде часто не требуется добавление химических соединений (например, при хлорировании водопроводной воды), а достаточно использование источника высокого электрического напряжения с вложением в разряд определенной электрической энергии. Кроме того, полезным свойством метода электроразрядной очистки загрязненной воды можно назвать селективность воздействия на некоторые типы соединений, которые следует избирательно удалить из раствора.

Поскольку электрический разряд происходит в газовой среде, то присутствие жидкости в микродисперсной фазе в плазме приводит к более сильному воздействию на свойства разряда при большей величине удельной поверхности жидкости. Данное свойство смеси газа и жидкости достигается при диспергировании последней: либо в воде формируется пузырьковая среда, либо из жидкости создают газокапельную среду (спрей). В последнем случае отношение объема всех капель жидкости к их суммарной площади поверхности будет, при прочих равных условиях, определять производительность плазмохимического реактора. Известно, [1] что в процессе генерирования перекиси водорода из воды с помощью электрического разряда, например, с помощью искрового или коронного разряда, эффективность процесса возрастает, если жидкость находится в диспергированном состоянии – в виде аэрозоля.

Для процесса электроразрядной генерации перекиси из воды существует другое обстоятельство, при котором использование спрея оказывается более выгодным. Поскольку перекись водорода хорошо растворима в воде, то после ее производства она частично растворяется в объеме водяных капель, что препятствует последующему разрушению этого химического соединения в окружающей капли плазме разряда [2]. В работе [3] исследовался процесс обеззараживания воды

под действием перекиси водорода, которая генерировалась в низкотемпературной плазме при атмосферном давлении. Показано, что при организации разряда в непосредственной близости к границе раздела жидкость–газ с увеличением времени работы плазменного устройства скорость роста концентрации, растворенной в воде, увеличивалась.

Другим примером эффективного применения спрея в электрическом разряде является процесс обесцвечивания раствора органических красителей в воде, т.к. данные соединения зачастую являются токсичными, канцерогенными или мутагенными. Так, например, при очистке воды от красителя indigo carmine в реакторе с применением пульсирующего коронного разряда наибольшую эффективность имеет процесс, в котором загрязненная вода подается в реактор в виде спрея [4]. Под эффективностью процесса подразумевается величина, равная отношению массы удаленного загрязнителя к затраченной электроэнергии. Значительное увеличение эффективности в случае подачи воды в реактор в виде спрея может быть обусловлено тем, что реакция наработанных активных химических соединений в электрическом разряде в газе с веществами-загрязнителями происходит либо вблизи границы раздела жидкость–газ, либо в объеме жидкости. В этом случае реализуется, с одной стороны, максимальная величина удельной площади поверхности контакта, а с другой – минимальное расстояние, которое необходимо пройти реагирующим веществам до этой поверхности.

Рассмотрим следующую модель движения реагирующих веществ к границе раздела жидкость–газ в случае газокапельного потока. Введем четыре характерных времени и три характерные длины:

$\tau_ж$ – время жизни активных частиц, определяемое плазмохимическими процессами;

$\tau_{д1}$ – время диффузии активных частиц на длину $r_к$, равную расстоянию между каплями $r_к \approx \approx n^{-1/3}$, т.е. $\tau_{д1} \approx 1/(6D_1 n^{2/3})$, где n – объемная концентрация капель, D_1 – коэффициент диффузии активных частиц в плазмообразующем газе;

$\tau_{д2}$ – время диффузии вещества-загрязнителя к границе раздела жидкость–газ, $\tau_{д2} \approx d^2/(6D_2)$, где d – характерный размер объема жидкости (в случае аэрозоля – характерный диаметр капель), D_2 – коэффициент диффузии вещества-загрязнителя в жидкости;

$\tau_т$ – время транспорта активных частиц потоком плазмы из зоны разряда до поверхности водного раствора $\tau_т \approx d/u$, где d – характерная длина зоны разряда вдоль потока, u – характерная скорость плазменной струи.

Соотношения между временами $\tau_ж$, $\tau_{д1}$, $\tau_{д2}$ и $\tau_т$ определяют эффективность использования аэрозоля по сравнению с другими методами подготовки загрязненной жидкости к плазмохимической очистке. Поскольку $\tau_ж$ определяется типом таких химически активных соединений как гидроксил (OH), перекись водорода (H_2O_2), озон (O_3) (возможно и других соединений с азотом) и параметрами плазмохимического процесса, то для выбранного типа разряда следует использовать возможность снижения величин времени $\tau_{д1}$, $\tau_{д2}$ и $\tau_т$. Из представленных выше соотношений следует, что одним из способов снижения $\tau_{д1}$ в случае аэрозоля является сокращение расстояния между каплями, что при заданном постоянном расходе жидкости эквивалентно уменьшению среднего размера капель и, соответственно, увеличению их концентрации n. При этом величина времени $\tau_{д2}$ будет также снижаться при уменьшении характерного диаметра капель. В случае существования электрического разряда в области нахождения газокапельной среды (аэрозоля) наработка активных частиц происходит в непосредственной близости к границе раздела жидкость–газ, а время транспорта образующихся в разряде активных компонентов в зону реакции оказывается наименьшим.

Таким образом, использование газокапельного потока в плазменных реакторах является более выгодным с точки зрения скорости процесса и его энергетической эффективности.

Целью данной работы является создание и экспериментальное исследование электрического разряда в газокапельной среде – “спрей-разряда”, включая как измерение электрических параметров самого разряда, так и определение усредненных характеристик газокапельной среды. Поскольку, по экспертной оценке, количество применений таких объектов в промышленности будет расти в виду высокой селективности и энергоэффективности процесса, необходимо экспериментально определить как сильное электрическое поле и плазма воздействуют на капли электропроводящей жидкости в газокапельном потоке, а также как аэрозоль воздействует на сам электрический разряд. Ранее [5] была проведена работа по исследованию процесса горения разряда в присутствии газокапельного потока. В настоящей статье приведены результаты дополнительных исследований, связанных со скоростным фотографированием свечения разряда в присутствии капель проводящей жидкости. При измерении электрических свойств разряда использовалась вода различной проводимости при постоянных прочих параметрах эксперимента. Следует также отметить, что в данной работе использовалась форсунка центробежного типа, которая генерирует распыл, в котором капли имеют сред-

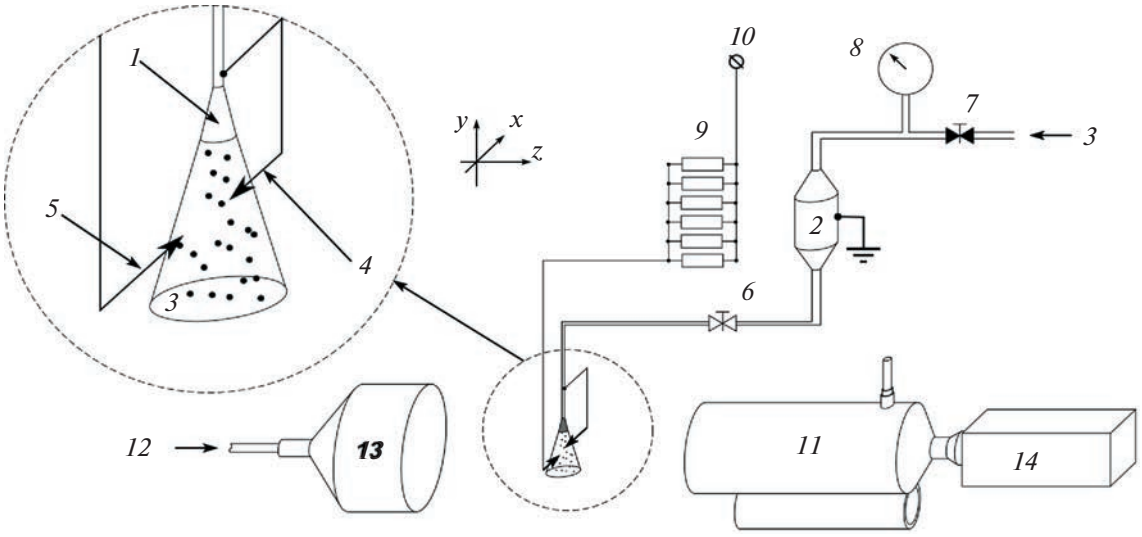

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – форсунка, *2* – сосуд высокого давления, *3* – сжатый воздух, *4* – заземленный электрод, *5* – высоковольтный электрод, *6* – кран, *7* – редуктор, *8* – манометр, *9* – балластный резистор, *10* – подключение высокого напряжения, *11* – микроскоп, *12* – лазерное излучение, *13* – оптика подсветки, *14* – видеокамера.

ний диаметр меньше, чем в предшествующей работе [5]. В данной работе исследовано воздействие допробойного электрического поля на скорость движения капель.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для выполнения поставленных задач была создана экспериментальная установка, снабженная оптическими системами диагностики: лазерной системой для двойного теневого микрофотографирования капель потока, а также системой цифрового скоростного фотографирования электрического разряда в потоке капель проводящей жидкости. На рис. 1 представлены схема установки. Форсунка *1* формирует распыл проводящей жидкости при вытеснении ее из сосуда высокого давления *2* (нержавеющая сталь) под действием сжатого воздуха *3*, поступающего в верхнюю часть сосуда через редуктор. Два электрода из меди *4* и *5* размещаются в газокапельный поток на некотором расстоянии от выходного отверстия форсунки. При подаче высокого напряжения между электродами формируется электрический разряд, который приводит к изменению свойств распыла проводящей жидкости. Измерение свойств распыла проводилось с помощью метода двойного теневого микрофотографирования [6, 7]. Дополнительно проводилась скоростная видеосъемка свечения разряда, созданного в газокапельном потоке.

2.1. Создание распыла жидкости

Как указано выше, создание распыла проводящей жидкости проводилось с помощью форсунки центробежного типа. Форсунка *1* (см. рис. 1) соединялась через кран 6 с сосудом высокого давления объемом 0.45 л, в который предварительно заливалась проводящая жидкость, а сверху (то есть над уровнем жидкости) подавался воздух под давлением. Регулировка давления производилась с помощью редуктора *7*, а измерение давления проводилось при помощи манометра 8. Во всех экспериментах избыточное давление жидкости было равно 6 атм.

Форсунка размещалась на расстоянии 5 см от межэлектродного промежутка таким образом, чтобы газокапельный поток распространялся сверху вниз. Величина этого расстояния выбиралась из следующих соображений. Оно должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить, с одной стороны, формирование распыла жидкости (т.е. окончание газодинамического дробления капель за счет торможения в воздухе) завершилось к моменту прихода к электродам, с другой – чтобы электрический разряд не происходил на поверхность форсунки, которая заземлена. Расстояние между форсункой и электродами не должно быть слишком велико, чтобы вблизи электродов и места измерения свойств распыла концентрация капель была такой, чтобы обеспечить непрерывное и стабильное горение разряда и достаточное количество зарегистрированных капель.

Когда формирование газокапельного потока закончилось, следует ожидать, что скорость капель различного диаметра должна быть одинаковой, а ее величина должна равняться скорости воздуха, увлекаемого каплями. Скоростью газокапельного потока будем считать равной этой величине.

В качестве проводящей жидкости использовался водный раствор хлорида натрия (NaCl) с концентрацией соли 5 г/л и 50 г/л, при этом проводимость полученного раствора составляла 10 мС/см [8] и 60 мС/см [9] соответственно. Для приготовления раствора использовалась дистиллированная вода, в которой растворялась соль, взвешенная на цифровых электронных весах с точностью измерения 10 мг. Необходимое количество приготовленного раствора набиралось в шприц объемом 150 мл, с его помощью жидкость наливалась в сосуд высокого давления. Было важно контролировать количество заливаемой жидкости (150 мл), т.к. в течение эксперимента можно было регистрировать время работы форсунки, а затем рассчитать расход жидкости через нее. Оказалось, что от эксперимента к эксперименту расход жидкости через форсунку был постоянным и составлял величину около 2 г/с, что свидетельствовало о том, что благодаря использованию дистиллированной воды отверстия и каналы форсунки не забивались, а на свойства распыла мог повлиять только электрический разряд или высокое напряжение.

2.2. Электрическая схема

Инициирование электрического разряда проводилось с применением электрической схемы, показанной на рис. 1. Электрический разряд происходил между двумя проводящими медными штыревыми электродами (*4*, *5*) диаметром 1 мм и радиусом закругления 0.5 мм. Расстояние между электродами составляло величину 1 см. Один из электродов *4* был заземлен, а второй *5* являлся высоковольтным электродом, который соединялся с балластным резистором, ограничивавшим ток разряда. Балластный резистор *9* был выполнен из пяти параллельно соединенных высоковольтных резисторов КЭВ-10 мощностью 10 Вт каждый. Второй контакт резистора соединялся с источником высокого напряжения до 15 кВ *10*. Высоковольтный источник имеет цифровые индикаторы, показывающие выходное напряжение U_{PS} и ток I цепи. Кроме того, источник имеет возможность ограничения выходного напряжения и тока (независимо). Корпус высоковольтного источника был заземлен, т.е. соединен с заземленным электродом *4*. Внутри корпуса расположены быстродействующие датчики выходного тока и напряжения, а их сигналы подавались на входы цифрового осциллографа для регистрации этих параметров.

Расстояние между электродами выбиралось таким образом, чтобы электрический разряд:

– стабильно горел при напряжении менее 15 кВ и при наличии капель проводящей жидкости,

– не возникал без подачи газокапельного потока в межэлектродный промежуток при напряжении 15 кВ,

– не возникал при напряжении 9 кВ и менее в присутствии капель.

Для измерения разрядного тока и падения напряжения на разрядном промежутке использовались токовый датчик Tektronix TCP303 с усилителем Tektronix TCPA300 и высоковольтный пробник LeCroy PPE20KV. Для записи осциллограмм сигналов этих датчиков использовался осциллограф LeCroy WaveRunner 66Zi с полосой пропускания 600 МГц и максимальной частотой дискретизации 2 ГВыб./с.

2.3. Высокоскоростная съемка

Для качественного понимания процесса формирования электрического разряда в присутствии распыла жидкости проводилось скоростное фотографирование свечения канала разряда. Для этого использовалась скоростная цветная видеокамера, способная производить съемку со скоростью 1000 к/с при разрешении 1 МПиксель. Камера была снабжена объективом (фокусное расстояние 100 мм), позволяющим проводить видеосъемку с пространственным разрешением 0.056 мм/пиксель, что соответствует увеличению около 4.7.

Дополнительно применялась монохромная скоростная видеокамера, которая благодаря лучшей светочувствительности позволяла проводить видеосъемку с меньшей экспозицией. Использовался тот же объектив, который обеспечивал то же пространственное разрешение (около 0.05 мм/пиксель).

2.4. Лазерная система для измерения свойств распыла

В исследовании проводилось теневое цифровое микрофотографирование распыла проводящей жидкости в присутствии высокого напряжения и плазмы разряда. Использовалась система с импульсной лазерной подсветкой области съемки, в которой в качестве объектива был микроскоп с большим рабочим расстоянием (11 на рис. 1). Лазерное излучение длиной волны 532 нм (12) с помощью красителя родамин 6G преобразовывалось в некогерентное излучение с длиной волны около 580 нм для того, чтобы фоновая подсветка была равномерной. Оптические элементы

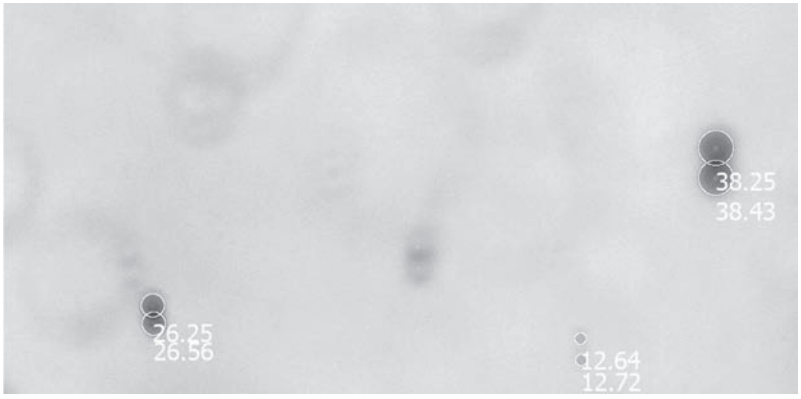

Рис. 2. Пример обработанной двойной фотографии распыла. Число вблизи изображения капли соответствует величине ее диаметра в микрометрах.

располагались таким образом, что область визуализации просвечивалась фоновой подсветкой. Съемка проводилась с применением CCD-видеокамеры (14) с двойной экспозицией, при этом лазер также был двойной. Это позволяло получать двойные теневые микрофотографии, в которых задержка между кадрами была порядка 1 мкс и более. Основные параметры системы следующие:

– пространственное разрешение 1 мкм/пиксель;

– скорость съемки 14 Гц;

– разрешение снимков: 2 МПикселей;

– размер видимой области 1 мм;

– задержка между двумя импульсами лазера 1 мкс и более.

Оптические элементы (оптика подсветки, микроскоп, видеокамера) были жестко закреплены на оптическом рельсе, который мог перемещаться в пространстве вдоль осей x, y, z (см. рис. 1), причем вдоль осей x и z это перемещение могло осуществляться с точностью 0.01 мм, а вдоль оси y с точностью 0.1 мм.

В течение одного эксперимента регистрировалось около 1000 двойных микрофотографий распыла с частотой съемки 14 Гц. После этого фотографии проходили обработку на компьютере для того, чтобы обнаружить отдельные капли, определить положение их центров и диаметры. В работах [6, 7] можно найти детальное описание алгоритмов распознавания изображений с целью определения диаметров капель и их положения. На рис. 2 представлен пример одной обработанной двойной микрофотографии (две части наложены друг на друга). Числа около окружностей – измеренные значения диаметров капель. Благодаря тому, что в результате обработки двойных фотографий удается получить не только величину диаметра капли, но также и координаты положения ее центра, измеренные в два момента времени, удается построить не только распределение количества капель по диаметру, но также и распределения компонент вектора скорости (и ее модуля) капель по диаметру. На рис. 3 представлены примеры гистограмм распределений по диаметру доли капель R (а) и их модуля вектора скорости V (б). Следует отметить, что на гистограмме (б) одно значение соответствует среднему значению скорости капель, чьи диаметры лежат в диапазоне значений шириной 1 мкм.

Из полученных распределений удается получить усредненные значения, характеризующие распыл в целом: количество обнаруженных капель N, средний диаметр (D_{10}), среднеквадратичное отклонение диаметров от D_{10} (rms(D)), средний диаметр по Заутеру (D_{32}), средняя скорость (или компонента скорости) капель ($\langle V_j \rangle$, j = “ ”, “x” или “y”), среднеквадратичное отклонение (rms(V_j)) от средней величины $\langle V_j \rangle$.

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

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

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

$$\langle V_j \rangle = \sum_{i=1}^{N} \frac{V_{ji}}{N},$$

$$\mathrm{rms}\left(V_j\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{(\langle V_j \rangle - V_{ji})^2}{N}}.$$

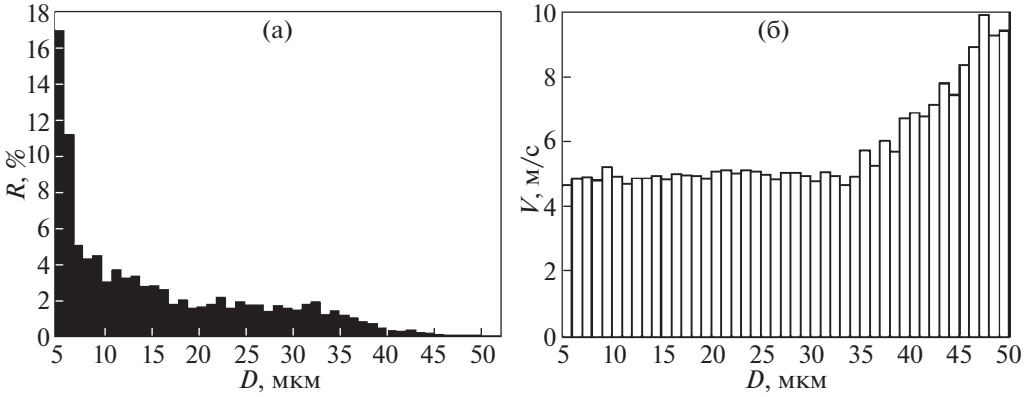

Рис. 3. Примеры распределений относительного количества капель R по диаметру капель D (а) и модуля вектора скорости капли V по диаметру D (б).

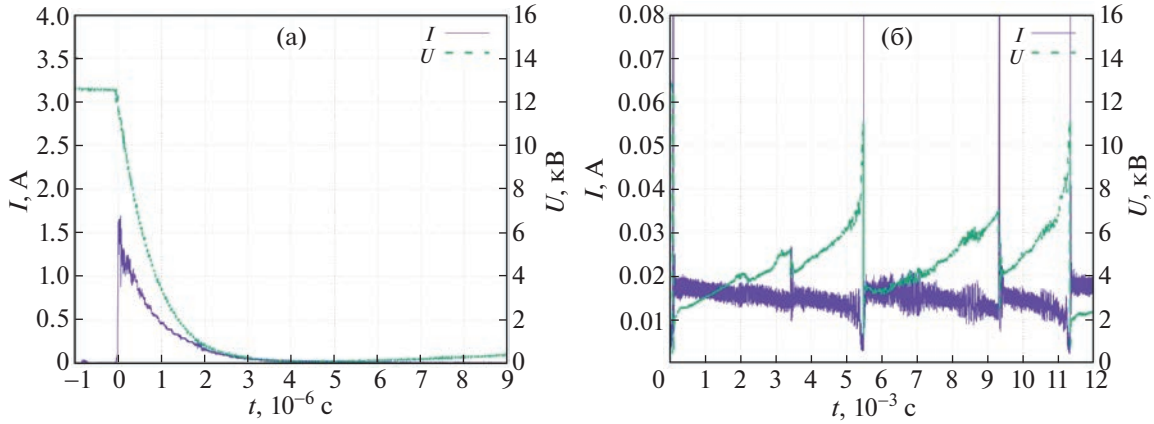

Рис. 4. Осциллограммы тока I и напряжения U в микросекундном (а) и миллисекундном диапазоне времени (б).

3. ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

3.1. Электрические параметры разряда

Первым этапом работы было измерение средних по времени электрических параметров разряда. Используемые в работе высоковольтный источник и высоковольтная схема позволяли ограничивать и, таким образом, задавать ток разряда, а также регистрировать его величину и величину выходного напряжения. В качестве проводящей жидкости, используемой для создания распыла, применялся раствор поваренной соли с концентрациями 5 г/л и 50 г/л. В качестве исходной воды использовалась вода такая, что добавление соли значительно увеличивало проводимость раствора. На рис. 5а представлены усредненные параметры разряда при концентрации соли 5 г/л.

Как будет понятно ниже (см. осциллограммы и последовательные фотографии), разряд представляет собой следующие друг за другом импульсы тока: разряд зажигается и погасает между электродами в случайные моменты времени, а сам процесс определяется непостоянной проводимостью среды между электродами, т.к. нахождение капель, их размеры, количество и скорости являются также случайными величинами. На рис. 4 представлены осциллограммы тока разряда и напряжения на межэлектродном промежутке при двух характерных масштабах времени: микросекунды (а) и миллисекунды (б). Видно, что электрический ток разряда имеет сильноточную стадию (рис. 4а), слаботочную стадию (рис. 4б). Первая стадия характеризуется временем 1 мкс и амплитудой тока порядка 1 А, вторая – временем 1 мс и током 10 мА. Существуют периоды времени (см. рис. 4б, время 5.3 мс), когда ток становится равным нулю, а напряжение на промежутке относительно быстро возрастает. При достижении определенного напряжения на межэлектродном промежутке процесс повторяется (см. рис. 4б, время 5.5 мс), а в течение одного эксперимента таких повторений множество, причем время меж-

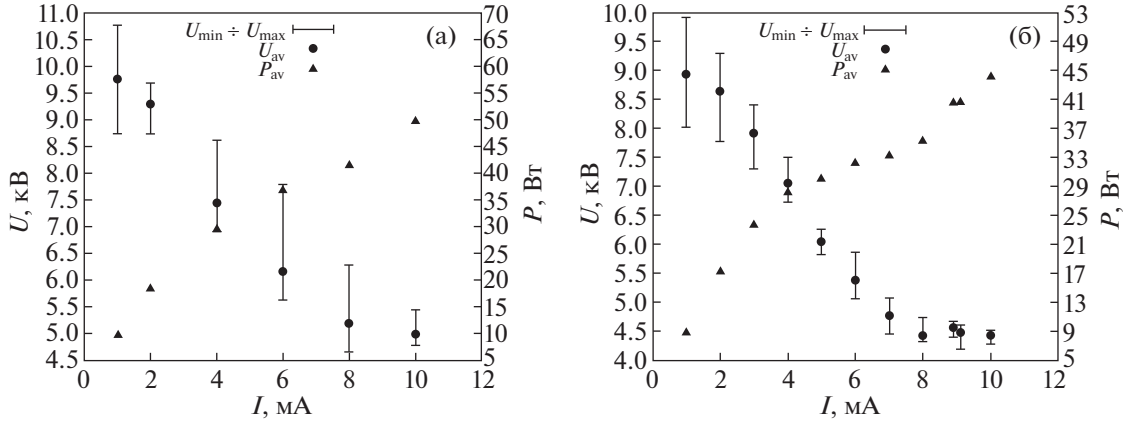

Рис. 5. Зависимости средних величин напряжения между электродами U и выделяемой электрической мощности P от среднего тока I при наличии спрея жидкости при различной концентрации хлорида натрия NaCl 5 г/л (а) и 50 г/л (б).

ду ними является случайной величиной и имеет значение порядка 1 мс.

Различные масштабы времени и тока на получаемых осциллограммах приводят к значительной ошибке при определении средних по времени значений тока, напряжения и мощности. В связи с этим данные были получены с использованием быстродействующих датчиков тока и напряжения, встроенных в высоковольтный источник напряжения, а их сигнал регистрировался с помощью цифрового осциллографа. Поскольку датчики находятся внутри источника, они подключены к выходному конденсатору, сглаживающему пульсации тока и напряжения.

После включения высоковольтного источника питания по цифровому индикатору контролировался момент времени выхода на режим, когда его показания становились равными установленному значению выходного тока. Наличие в цепи сглаживающего конденсатора и балластного сопротивления относительно большой величины (R = 860 кОм) обеспечивает относительно медленные изменения тока и напряжения, что позволило проводить регистрацию осциллограмм тока и напряжения с применением датчиков, встроенных в источник. Усреднение осциллограмм проводилось каждую секунду, при этом регистрировалось среднее значение I тока в цепи, среднее значение U_{PS} напряжения на выходе источника, среднее значение электрической мощности P, выделяемой в разряде. Среднее значение (за одну секунду) падение напряжения U на разрядном промежутке можно рассчитать по формуле

$$U = U_{PS} - IR$$

Таким образом, при записи выходного напряжения от времени можно получить величины минимального U_{min}, максимального U_{max} напряжения, усредненного за одну секунду, среднего за время всего эксперимента U напряжения между электродами (см. рис. 5а).

Дополнительно было проведено измерение средних по времени электрических параметров при увеличении на порядок концентрации поваренной соли в воде (50 г/л). Оказалось, что в результате выходное напряжение источника понизилось при той же величине разрядного тока. Однако существенного изменения энерговклада в газокапельную среду не происходит (см. рис. 5б). В связи с этим, а также из-за некоторых технических особенностей проведения эксперимента, было принято решение проводить исследования с применением раствора соли с концентрацией 5 г/л. Также необходимо отметить, что при нулевой концентрации соли в воде разряд в распыле не возникал при условиях эксперимента.

3.2. Результаты фотографирования разряда

Скоростное фотографирование электрического разряда проводилось с помощью цветной видеокамеры в двух режимах:

– при скорости съемки 30 к/с и экспозиции около 16 мс,

– при скорости 1000 к/с и экспозиции 0.7 мс.

На рис. 6 представлены полученные характерные цветные фотографии разряда. Движение капель сверху вниз. Важно отметить, что на фотографиях видны не только нитевидные светящиеся структуры, характерные для искрового разряда, но также и отдельные светящиеся точки. Капли, попадая в канал тлеющего разряда, частично испаряются, что приводит к локальным изменениям проводимости и к увеличению интенсивности свечения. Цвет свечения желтый, что свидетельствует о наличии натрия в плазме разряда.

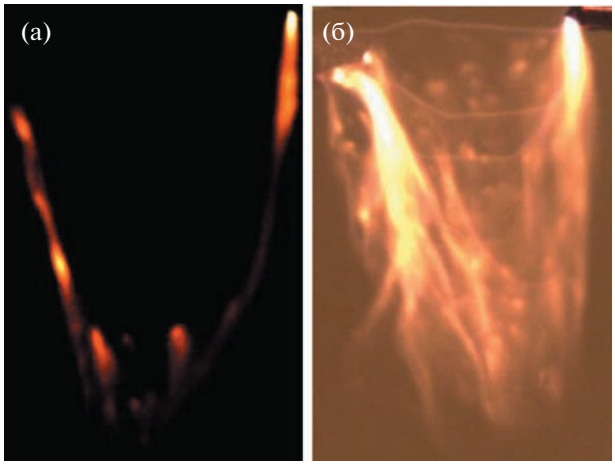

Рис. 6. Характерные кадры видеосъемки разряда при экспозиции кадров 0.7 мс (а) и 16 мс (б). Высота каждого изображения 2 см.

Фотографирование с помощью более чувствительной монохромной видеокамеры проводилось при скорости съемки 7500 к/с и при экспозиции 10 мкс. На рис. 7 представлена часть характерной кинограммы процесса горения разряда, включающая две стадии – искровой разряд и тлеющий разряд атмосферного давления. На первом кадре видно, что свечение разряда отсутствует. Это соответствует моменту времени, когда ток разряда близок к нулю (см. рис. 4б, 5.3 мс). На втором кадре виден канал минимальной длины и относительно большого свечения – это искровой разряд. Последующие кадры соответствуют второй стадии – горению тлеющего разряда, который характеризуется меньшим значением тока и, соответственно, меньшей интенсивностью свечения. Канал разряда смещается газокапельным потоком в направлении его движения. Скорость этого смещения на данной кинограмме составляет величину около 5 м/с, что, как будет показано далее, соответствует средней скорости капель. По мере увеличения длины канала разряда его сопротивление растет, что приводит к уменьшению тока разряда и увеличению падения напряжения на электродах. Через время около 4 мс разряд гаснет, ток становится равным нулю, а напряжение на электродах возрастает. Когда разность потенциалов электродов достигает достаточного значения, процесс повторяется.

Кроме того, на кинограмме видно образование зон повышенного свечения. Это может быть объяснено тем, что капли попадают в канал разряда, испаряются, что приводит к локальному повышению концентрации соли натрия в плазме и, соответственно, к повышению интенсивности свечения в этом месте. Из-за диффузии концентрация испарившейся жидкости уменьшается, и интенсивность свечения падает, а размер области повышенной интенсивности свечения увеличивается.

Таким образом, из проведенных данных скоростной видеосъемки следует, что в одной и той же области пространства вблизи электродов электрический разряд возникает многократно, что вызывает частичное испарение капель проводя-

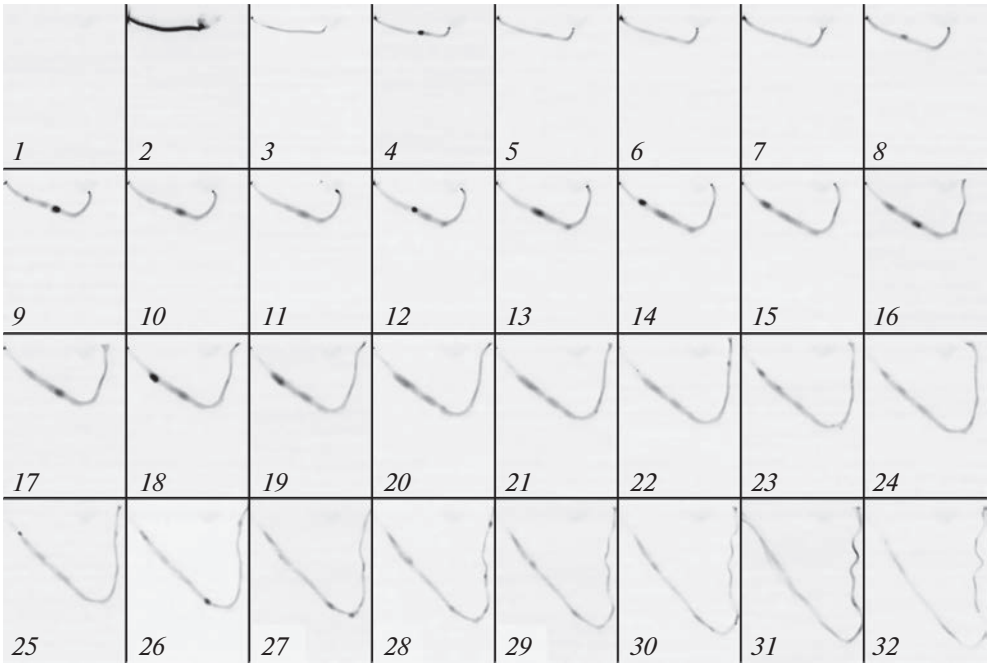

Рис. 7. Характерные последовательные кадры (негатив) видеосъемки разряда при экспозиции кадров 10 мкс и скорости 7500 к/с. Высота каждого изображения 1.5 см.

Таблица 1. Результаты измерений свойств распыла проводящей жидкости вблизи заземленного электрода разрядника

№	N	n, 10^3 $см^{-3}$	D_{10} мкм	$D32$ мкм	rms(D) мкм	$\langle V\rangle$ м/с	rms(V) м/с	$\langle V_x\rangle$ м/с	rms(V_x) м/с	$\langle V_y\rangle$ м/с	rms(V_y) м/с	I мА	U, кВ	P, Вт
1	2974	5.1	11.16	27.19	8.29	5.85	1.12	–0.14	0.49	–5.82	1.12	10	4.9	49
2	2607	4.2	10.91	26.63	8.03	5.62	1.46	–0.11	0.54	–5.59	1.46	8	5.1	41
3	2759	4.6	10.12	22.29	7.00	6.02	1.30	–0.09	0.52	–6.00	1.31	6	6.0	36
4	2561	4.1	10.96	28.71	8.66	4.43	1.53	0.02	0.52	–4.40	1.54	4	7.5	30
5	2624	4.3	9.57	23.61	6.97	4.59	1.60	–0.09	0.51	–4.56	1.61	2	9.4	19
6	2806	4.7	9.25	20.76	6.17	5.78	1.20	–0.27	0.46	–5.76	1.21	1	9.6	10
7	3258	5.9	9.62	24.88	7.04	5.17	1.36	–0.29	0.47	–5.14	1.36	0	9	0
8	3504	6.6	9.93	23.39	7.15	6.14	1.27	–0.31	0.45	–6.11	1.28	0	6	0
9	4171	8.5	10.18	22.76	7.18	6.26	1.47	–0.21	0.50	–6.24	1.48	0	3	0
10	5638	13.0	9.79	19.24	6.05	6.72	1.11	–0.33	0.49	–6.69	1.11	0	0	0

щей жидкости. Этим и объясняется видимая вытянутая форма разряда и цвет свечения, соответствующий желтым линиям натрия в спектре излучения.

3.3. Измерение свойств распыла при наличии разряда и высокого напряжения

В связи с тем, что в объеме вблизи электродов одновременно присутствуют и область энерговыделения, и область повышенного напряжения, представляется интересным исследовать, как меняются свойства распыла при различных величинах энерговклада в газокапельный поток. Простые оценки показывают, что если бы вся выделяемая в разряде энергия (максимальная мощность около 50 Вт) уходила на нагрев воды (расход 2 г/с), ее температура повысилась бы всего на 6°C, что не достаточно для ее испарения. С другой стороны, на кадрах скоростных кинограмм видно, что отдельные капли испытывают испарение. Испарение относительно небольшой доли капель происходит при непосредственном попадании капли в относительно тонкий канал тлеющего разряда, температура которого может достигать тысячи градусов [10].

Кроме того, наличие высокого напряжения между электродами создает локальное электрическое поле высокой напряженности, и капли распыла могут втягиваться в данную область и менять свою скорость. Для проверки этого обстоятельства были проведены эксперименты с приложенным электрическим полем (подавались разные величины напряжения между электродами), но без разряда. В таблице 1 приведены данные по измерению свойств распыла проводящей жидкости при различных значениях напряжения U_{PS}, установленного на выходе высоковольтного источника. Если в колонке I (ток разряда) значение равно 0 мА, то разряд не возникает. Измерения проводились в точке, которая находится на расстоянии 5 мм ниже края заземленного электрода (направление движения капель также сверху вниз). Данные скоростного фотографирования плазмы разряда свидетельствует о том, что в этом месте присутствует энерговыделение.

Кроме того, в табл. 1 даны оценочные величины концентрации капель n, усредненной по времени, в точке, в которой проводилось измерение свойств распыла. Оценка проводилась по следующей формуле:

$$n \sim \left(\frac{N}{KS}\right)^{3/2},$$

где N – количество капель, зарегистрированных в эксперименте, K – количество кадров в эксперименте (всегда это количество было равно 1000), S – площадь видимой микроскопом области ($S = 1$ мм^2).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

При выполнении работы оказалось, что при прочих равных условиях величина концентрации хлорида натрия NaCl слабо влияет на величину энергии, выделяемой в электрическом разряде. В этом случае варьирование концентрации происходило на один порядок от 5 г/л до 50 г/л. Следует отметить, что при нулевой концентрации соли разряд не возникал даже при максимальной величине приложенного напряжения 15 кВ. Однако разряд существовал, а его соответствующие параметры (ток, напряжение, мощность) были относительно близкими, при изменении величины проводимости на один порядок (от 5 г/л до 50 г/л). По всей видимости, процесс горения разряда определяется в данном случае количеством капель в межэлектродном промежутке.

Тот факт, что разряд не возникает при отсутствии капель в межэлектродном промежутке, го-

ворит о том, что их наличие снижает эффективное пробойное напряжение между электродами. Это может достигаться двумя способами. Искровому разряду может предшествовать стадия существования коронного разряда относительно небольшого тока ~100 мкА [10], выделение энергии в этом разряде может частично увеличивать проводимость газа между электродами, снижая необходимую для возникновения искрового разряда величину напряжения. После того, как искровой разряд завершился, по его каналу начинает протекать относительно небольшой ток величиной порядка 10 мА, что соответствует стадии тлеющего разряда атмосферного давления [10]. Этот разряд существует в течение нескольких миллисекунд, и в течение этого времени в канал могут попадать капли распыла жидкости и испаряться, что может увеличивать проводимость в канале и вызывать локальное повышение интенсивности свечения за счет увеличенной концентрации соли натрия. По мере движения вниз по потоку область пара расширяется, а канал сдувается газокапельным потоком. Поскольку капли с паром продолжают двигаться от электродов, длина искры разряда существенно удлиняется. Этим объясняется вытянутая вниз форма разряда. В определенный момент напряжения между электродами недостаточно, чтобы разряд продолжал вытягиваться вниз, и вновь начальный искровой разряд возникает вблизи межэлектродного зазора, а новые прибывающие капли участвовали в разряде.

Результаты показывают, что наличие высокого напряжения приводит к изменению средней скорости всех капель в распыле. Наличие же разряда также приводит к изменению величины скорости, но это изменение зависит не монотонно от мощности (тока), т.к. при ее (или его) повышении величина напряжения на электродах в среднем по времени падает, так что ускоряющее (или замедляющее) действие электрического поля уменьшается.

Наличие электрического разряда приводит к испарению капель, о чем свидетельствуют не только фотографии разряда, но также и результаты измерения свойств распыла. Если величина D_{10} практически не меняется (растет незначительно с увеличением мощности разряда), то величина D_{32} заметно возрастает. Данное обстоятельство связано с тем, что теплообмен между областью воздуха, нагретого разрядом, и каплями в этой области происходит через их поверхность, площадь которой пропорциональна квадрату диаметра. При этом убыль диаметра капли обратно пропорциональна величине оставшегося объема капли после испарения. Таким образом, следует ожидать, что более крупные капли будут менее интенсивно испаряться, чем мелкие. В связи с этим, чем больше мощности вкладывается в разряд, тем больше оказывается величина D_{32} в распыле.

5. ВЫВОДЫ

Измерены средние электрические параметры разряда в газокапельном потоке – спрее проводящей жидкости (раствора NaCl в воде). Показано, что при условиях эксперимента концентрация соли в воде слабо влияет на выделяемую в разряде мощность. С помощью скоростной видеосъемки обнаружено, что капли раствора претерпевают испарение при пробое межэлектродного промежутка. Т.к. капля с паром продолжают двигаться по инерции, форма разряда оказывается вытянутой по направлению движения капель. С помощью измерения свойств распыла показано, что наличие электрического поля (без разряда) вблизи электродов приводит к изменению средней скорости капель. Наличие плазмы электрического разряда приводит к частичному испарению капель распыла, причем скорость испарения мелких капель больше, чем скорость испарения крупных, поскольку скорость этого процесса определяется отношением объема капли к ее поверхности, через которую происходит теплообмен с плазмой разряда. В результате в среднем оказывается, что средний размер капли распыла D_{10} и ее средний объем по Заутеру D_{32} возрастают с увеличением мощности разряда.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Locke B.R. and Shih K.-Y.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. V. 20. 034006
2. *Thagard S.M. and Locke B.R.* Electrical discharge plasma for water treatment / Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Ed. by *Stefan M.I. London*: IWA Publishing. 2018. Chapter 12. P. 493.
3. *Li Z., Zhang X., Qi M., Zhao X., Qu Z., Wang X., Li W., Xu D.* // J. Appl. Phys. 2023. V. 134. 093301.
4. *Malik M.A.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2010. V. 30 (1) P. 21.
5. *Saveliev A.S.* // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49 (5). P. 626.
6. *Савельев А.С.* // Вестник Объединенного института высоких температур. 2019. Т. 2. С. 69.
7. *De Cock N., Massinon M., and Lebeau F.* Agricultural spray measurement by high-speed shadow imagery / Proc. of the International Advances in Pesticide Application, Oxford, United Kingdom, 2014. p. 122.
8. *Widodo C.S., Sela H., and Santosa D.R.* // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2021 (1). 050003.
9. *Rao S.M., and Thyagaraj T.* // Appl. Clay Sci. 2007. V. 38. P. 113.
10. *Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Панькин М.В., Петряков А.В., Трушкин Н.И.* // Физика плазмы. 2008. № 4. С. 347.