

УДК 537.525

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2021 г. Р. И. Валиев¹, А. А. Хафизов¹, Л. Н. Багаутдинова^{2, *}, Ф. М. Гайсин², Р. Ш. Басыров²,
Аз. Ф. Гайсин³, Ал. Ф. Гайсин⁴

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: lilup@bk.ru

Поступило в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принято к публикации 19.05.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований электрического разряда переменного тока ($f = 50$ Гц) в газожидкостной среде электролита с пузырьками для межэлектродных расстояний 50–150 мм внутри диэлектрической трубки. Наличие пузырьковой структуры с микроразрядами влияет на характер пульсаций тока и напряжения разряда. Установлен частотный спектр колебаний напряжения и тока разряда с использованием быстрого преобразования Фурье. На основе анализа экспериментальных данных установлен механизм развития электрического разряда переменного тока в среде с микропузырьками.

DOI: 10.31857/S0040364421040219

ВВЕДЕНИЕ

Исследования электрических разрядов переменного тока в газожидкостной среде с пузырьковой структурой имеет большой практический и научный интерес. Газожидкостные среды и течения представляют, как правило, двухфазную систему “газ–жидкость”, с помощью которой можно решить многие промышленные, бытовые и экологические проблемы. Использование в таких структурах электрических разрядов вносит новые эффекты и возможности применения. В [1] исследуется возможность эффективного применения импульсных электрических разрядов в газожидкостных средах с пузырьками, в том числе для защиты высоковольтного оборудования в энергетике. Формированию разряда, как правило, предшествует пробой, механизм которого изучается как для газовых систем, так и для жидкостей. Механизмы импульсных разрядов в диэлектриках (жидкие углеводороды) изучается в [2–4], где рассматривается общая картина явлений при низкой вероятности пробоя. Наличие пузырьковой структуры под действием ультразвука [5] влияет на динамику тока и напряжения разряда, а также на скорость развития разряда [6]. В [7–11] рассмотрены установки по получению газожидкостных систем, использующихся во многих областях промышленности. В частности, важную роль они

играют в инженерной экологии применительно к водоочистке, в том числе к интенсификации биологической очистки стоков. В [12] проведено исследование метода получения газожидкостных смесей с пузырьковой структурой повышенной устойчивости на универсальном лабораторном стенде. Установлены зависимости диаметра пузырьков воздуха от расхода жидкости и воздуха, а также получены данные по гидродинамическому режиму двухфазной системы “газ (воздух) – жидкость (вода)”.

Целью данного исследования является изучение электрических разрядов переменного тока частотой 50 Гц в газожидкостной среде хлорида натрия в дистиллированной воде с пузырьковой структурой и микроразрядами. В данном случае сплошной фазой является раствор хлорида натрия в воде, а дисперсной – воздух.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка (рис. 1а) для исследования электрических разрядов переменного тока в газожидкостной среде 1%-ного раствора хлорида натрия в дистиллированной воде при атмосферном давлении состоит из разрядной

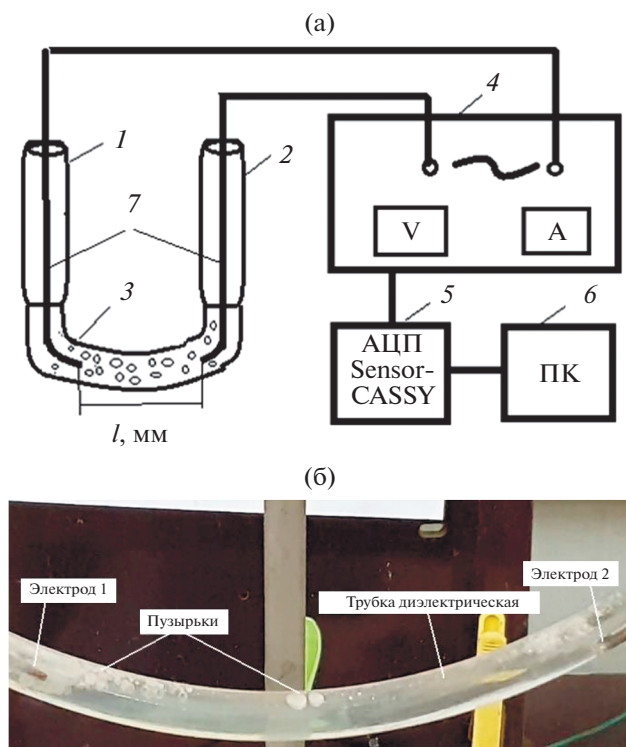


Рис. 1. Экспериментальная установка для получения и исследования электрического разряда переменного тока частотой 50 Гц при атмосферном давлении: (а) – функциональная схема, (б) – диэлектрическая трубка с электролитом и электродами.

камеры, источника питания переменного тока 4, универсального аналого-цифрового преобразователя Sensor-CASSY 5 и компьютера 6. Разрядная камера включает в себя две капельные воронки 1 и 2, соединенные между собой диэлектрической трубкой 3 диаметром 10 мм и поставленные на два штатива. В верхние открытые части воронок погружены медные проволоки 7 диаметром 1.5 мм для подачи потенциала. Межеlectродное расстояние в данных экспериментах составляло 50, 100 и 150 мм. Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) разряда, а также зависимостей пульсаций напряжения и тока разряда от времени использовался универсальный аналого-цифровой преобразователь Sensor-CASSY, который подключался ко USB-входу компьютера с помощью кабеля. Полученные с преобразователя данные обрабатывались на компьютере в программе CASSY Lab. Для увеличения пределов измерения напряжения Sensor-CASSY подключался через делитель напряжения. Для измерения силы тока применялся трансформатор тока фирмы TALEMA INDIA марки AC 1010. Для фото- и видеофиксации использовалась цифровая видеокамера 4K Canon XC10. Скорость видеосъемки – 50 кадр/с.

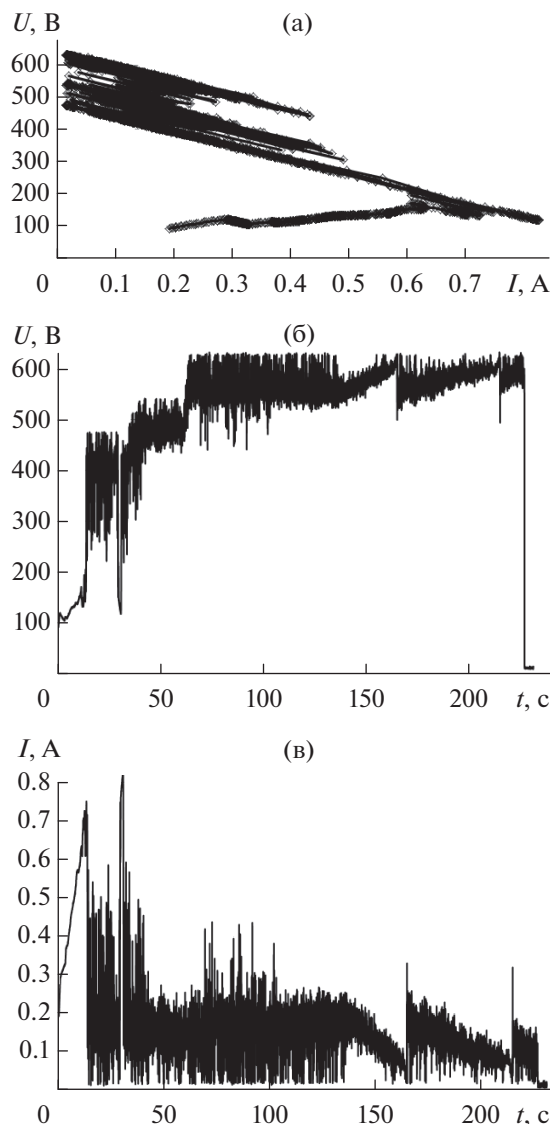


Рис. 2. Электрические характеристики разряда переменного тока в 1%-ном электролите NaCl при межэлектродном расстоянии 50 мм: (а) – ВАХ; (б), (в) – зависимости напряжения и тока от времени соответственно.

На рис. 1б представлен фрагмент диэлектрической трубки с электролитом и электродами. Внешний диаметр трубки – 10 мм. Размеры пузырьков и их число оценивались визуально по данным видеофиксации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований электрического разряда переменного тока в газожидкостной среде с пузырьковой структурой и микроразрядами представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 приведены ВАХ разряда переменного тока и зависимости напряжения и тока разряда от

времени при межэлектродном расстоянии 50 мм. Как видно из ВАХ (рис. 2а), в интервале тока от 0.2 до 0.8 А наблюдается увеличение напряжения на 120 В. Этот интервал роста напряжения и тока определяется электролизом внутри диэлектрической трубки, что подтверждается зависимостями напряжения (рис. 2б) и тока (рис. 2в) в начале разряда: зависимость $U(t)$ имеет экспоненциальный характер с пульсациями относительно среднего значения напряжения. Кроме того, зависимость $U(t)$ растет ступенчато от 0.12 до 55 с. В указанном интервале времени в пористой среде происходят пробои с последующими микроразрядами, что подтверждается зависимостью $I(t)$ (рис. 2в). Здесь наблюдается первичный пробой пористой среды при напряжении 400 В и токе 0.75 А. Второй пробой происходит в среде с пузырьками и микроразрядами при $U = 400$ В и $I = 0.85$ А. В диапазоне времени от 55 до 140 с пульсации напряжения стабилизируются в пределах $\Delta U = 100$ В. Однако в интервале времени между 140 до 225 с напряжение начинает пилообразно пульсировать. Пульсации напряжения и тока характеризуют пробой и зажигание микроразрядов.

С ростом межэлектродного расстояния от 50 до 150 мм ВАХ зависимости $U(t)$ и $I(t)$ имеют свои особенности. Анализ ВАХ при всех межэлектродных расстояниях показывает, что они имеют возрастающий характер в период электролиза и падающий при разряде. С ростом межэлектродного расстояния от 50 до 150 мм разброс значений ΔU относительно среднего значения существенно увеличивается, так как вероятность пробоя уменьшается.

На основе анализа данных видеофиксации разряда и электрических характеристик удалось установить механизм развития электрического разряда переменного тока в газожидкостной среде с пузырьками и микроразрядами при атмосферном давлении. После включения высоковольтного источника питания переменного тока начинается процесс электролиза с возрастающей ВАХ. Начало процесса можно видеть на рис. 1б. За счет электролиза внутри диэлектрической трубки между электродами образуются пузырьки различных размеров и форм. Их размеры составляют от 0.5 до 12 мм. Пузырьки воздуха скапливаются вверху средней части диэлектрической трубки, движутся к электродам и схлопываются. Перед пробоем и зажиганием разряда наблюдается бурное перемешивание пузырьков, а также образование больших пузырьков овальной формы и их деление. Зажигание разряда происходит около одного из медных электродов. С течением времени разряд перемещается вдоль диэлектрической трубки от одного электрода к другому. Образование структуры с пузырьками происходит в течение всего процесса горения электрического разряда.

Идеальный разрядный промежуток можно рассматривать как нелинейный элемент (НЭ), который характеризуется напряжением пробоя

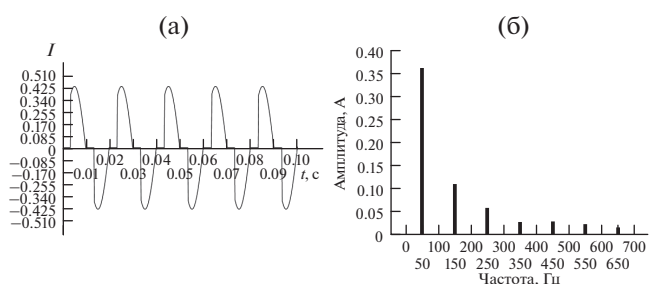


Рис. 3. Зависимость тока от времени (а) и спектр тока (б) для идеального НЭ.

$U_{пр}$, напряжением горения $U_{гор}$ и напряжением гашения $U_{гаш}$. Когда напряжение на НЭ меньше чем $U_{пр}$, при его нарастании ток через НЭ не протекает, далее ток определяется согласно формуле

$$I(t) = \frac{U(t) - U_{гор}}{R}$$

При убывании напряжения и $U(t) < U_{гаш}$ также $I = 0$.

Зависимость тока от времени для идеального НЭ с постоянными параметрами $U_{пр}$, $U_{гор}$ и $U_{гаш}$ при приложении синусоидального напряжения с частотой 50 Гц показана на рис. 3а. Спектр данного сигнала, полученный разложением $I(t)$ в ряд Фурье, приведен на рис. 3б. Спектр имеет составляющие с частотами, нечетно кратными основной частоте 50 Гц.

Реальный разрядный промежуток между двумя медными электродами внутри диэлектрической трубки можно рассматривать как НЭ со стохастически меняющимися параметрами $U_{пр}$, $U_{гор}$ и $U_{гаш}$. На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения и тока разряда. Флуктуациям в большей степени подвержены значения тока.

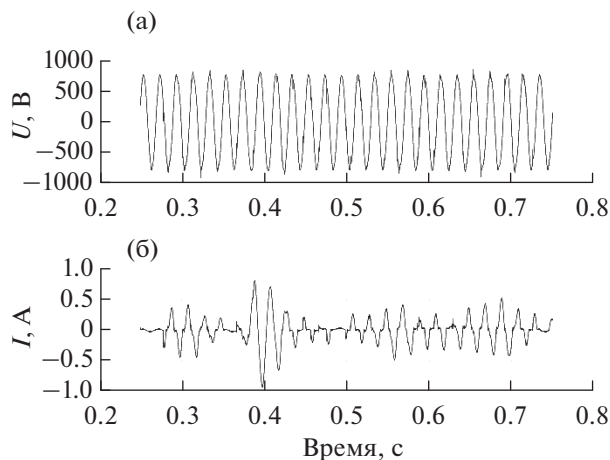


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б).

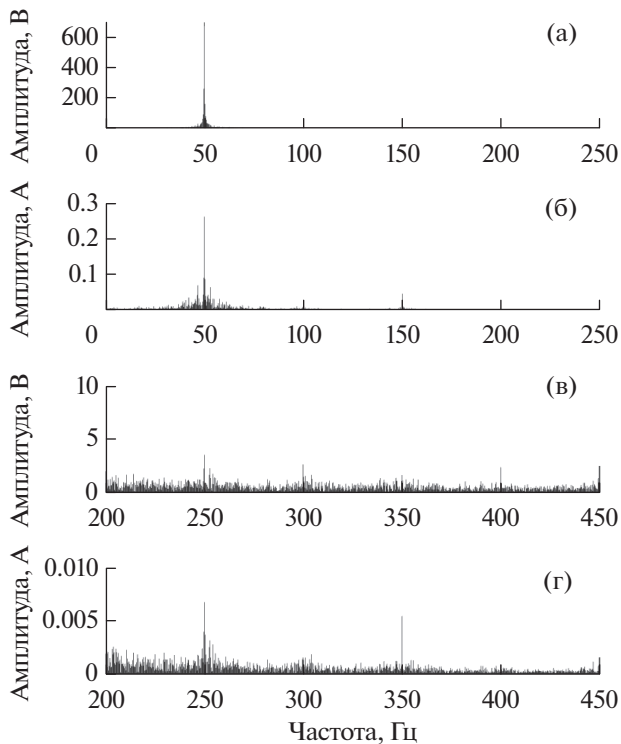


Рис. 5. Спектры напряжения (а), (в) и тока (б), (г) для интервалов частот 0–250 Гц (а), (б) и 200–450 Гц (в), (г).

Для получения спектров пульсаций были проведены измерения напряжения и тока через интервал времени 50 мкс. С помощью быстрого преобразования Фурье получены спектры напряжения и тока (рис. 5). В спектре напряжения проявляется то, что напряжение мало подвержено флуктуациям. В спектре тока наблюдаются пики, соответствующие частотам 50, 150, 250, 350 Гц и т.д., аналогично рис. 3б. Помимо этих частот имеются промежуточные частоты, составляющие практически сплошной спектр. Они возникают в результате стохастических пробойно-разрядных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что разряд переменного тока в среде с пузырьками и микроразрядами нестабилен за счет пульсаций напряжения и тока разряда.
2. Установлено, что вероятность пробоя в электролите существенно зависит от межэлектродного расстояния и наличия пузырьковой структуры с микроразрядами.
3. Определен механизм развития разряда переменного тока внутри диэлектрической трубки в газожидкостной среде с пузырьками и микроразрядами.
4. Установлен частотный спектр колебаний напряжения и тока разряда с использованием быстрого преобразования Фурье: в спектре тока

наблюдаются пики, соответствующие частотам 50, 150, 250, 350 Гц и т.д., тогда как напряжение разряда мало подвержено флуктуациям.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортон В.Е., Сон Э.Е., Исакаев М.-Э.Х., Карпухин А.В. Способ защиты маслонаполненного трансформатора от взрыва и маслонаполненный трансформатор с защитой от взрыва. Патент РФ № 2516307. 2012.
2. Торшин Ю.В. Импульсный электрический пробой жидких углеводородов. Картина явления в резко неоднородном поле при низкой вероятности пробоя // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 662.
3. Торшин Ю.В. Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков. М.: Энергоатомиздат, 2008. 212 с.
4. Гайсин Аз.Ф., Садриев Р.Ш., Багаутдинова Л.Н., Насибуллин Р.Т., Гайсин Ф.М., Мастюков Ш.Ч. Электрические разряды малой мощности с металлическими, диэлектрическими и электролитическими электродами при низких частотах и атмосферном давлении // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 860.
5. Булычев Н.А., Казарян М.А., Ивашкин П.И., Захарян Р.А., Аверюшкин А.С., Чернов А.А., Чайков Л.Л. Влияние ультразвуковой кавитации на динамику и характеристики электрического разряда в жидкости // ФИАН. 2017. Т. 44. № 2. С. 9.
6. Панов В.А., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Печеркин В.Я., Сон Э.Е. Распространение искрового канала в жидкости с микропузырьками // Прикл. физика. 2016. № 1. С. 61.
7. Панов В.А., Куликов Ю.М., Сон Э.Е. Ячейка для плазмохимической очистки загрязненной жидкости. Патент РФ № 134921. 2013.
8. Сон Э.Е., Суворов И.Ф., Какаунов С.В., Гайсин А.Ф., Самитова Г.Т., Соловьева Т.Л., Юдин А.С., Рахлецова Т.В. Электрические разряды с жидкими электродами и их применение для обеззараживания вод // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 512.
9. Mardanov R.R., Kayumov R.R., Akhatov M.F., Gaisin A.F. A Review of Use of Barrier Discharge for Modification of Surface of Polymers // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1588(1). 012029.
10. Галимзянов И.И., Гайсин А.Ф., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Каюмов Р.Р. Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 306.
11. Быков А.А. Исследование газожидкостных течений и характеристик электрического разряда в процессах очистки промышленных и бытовых сточных вод. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. С. 24.
12. Долгобородова С.Н. Лабораторное исследование метода получения газожидкостных смесей повышенной устойчивости для интенсификации биологической очистки сточных вод // Фундаментальные исследования. 2014. № 12. С. 1398.