

УДК 537.525

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ОДНОПРОЦЕНТНОМ РАСТВОРЕ ХЛОРИДА НАТРИЯ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2022 г. А. А. Хафизов¹, Р. И. Валиев¹, Л. Н. Багаутдинова^{2, *},
Аз. Ф. Гайсин³, Ал. Ф. Гайсин⁴, Ф. М. Гайсин², Э. Е. Сон⁴, И. Т. Фахрутдинова²

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 24.01.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принято к публикации 07.06.2022 г.

Представлены результаты экспериментального исследования разряда переменного тока с частотой 50 Гц в газожидкостной среде 1%-ного раствора NaCl в дистиллированной воде с пузырьками воздуха и микроразрядами внутри диэлектрической трубки с диаметром 10 мм при пониженных давлениях для различных межэлектродных расстояний медных электродов: 50, 100 и 150 мм. Установлен качественный механизм развития пробоя и разряда при пониженных давлениях в газожидкостной среде. Выявлено, что с понижением давления образуется газожидкостная среда, насыщенная мелкими пузырьками воздуха размером от 1 до 3 мм в результате кипения и электролиза. Это, в свою очередь, приводит к пробоя и быстрому зажиганию разряда в пористой среде около твердого электрода. Установлен переход электрического разряда с микроразрядами в объемный разряд при пониженных давлениях. Проведено быстрое преобразование Фурье, и определены спектры напряжения и тока разряда при пониженных давлениях.

DOI: 10.31857/S0040364422020065

ВВЕДЕНИЕ

Исследования электрических разрядов с жидкими электродами в пузырьках воздуха и парах жидкости проводились в немногих работах, но имеют большое практическое значение [1–6]. В [3, 7–14] исследовались электрические разряды постоянного тока в пузырьках и капиллярах. Установлено, что внутри пузырьков воздуха горят микроразряды. Это возможно из-за большого различия в плотности газа и жидкости. Но даже в таком случае пузырьки не касаются металлического электрода. В [8] наблюдались микроразряды в пузырьках совместно с малыми стримерами. Отмечено, что с повышением напряжения возникают искры, причем напряжение искрообразования снижается с увеличением интенсивности генерации пузырьков. В работах [10–13] рассмотрены некоторые особенности многоканального разряда в диэлектрической трубке при атмосферном давлении в газожидкостной среде с пузырьками воздуха и микроразрядами. Однако, несмотря на большую практическую значимость электрических разрядов переменного тока с ча-

стотой $f = 50$ Гц в пористых средах с микроразрядами, практически мало исследованы как физические, так и электрические их характеристики. В [5, 6] при рассмотрении электрических разрядов переменного тока при понижении давления до 400 Торр было выяснено, что при погружении металлического анода в электролит вокруг него горит аномальный тлеющий разряд с возрастающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

Целью данной работы являются экспериментальные исследования характеристик и развития разряда переменного тока в диэлектрической трубке в газожидкостной среде с пузырьками воздуха и микроразрядами в 1%-ном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде в широком диапазоне давлений.

Описание экспериментальной установки и методики исследований приведены в [15]. Отличие установки состоит в том, что в данном случае используется высоковольтный источник питания переменного тока без выпрямителя, собранного по схеме Ларионова.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования особенностей электрического разряда переменного тока между металлическими электродами проводились в следующих диапазонах: ток $I = 0.1\text{--}3$ А, напряжение $U = 0\text{--}4$ кВ, расстояние между электродами внутри диэлектрической трубки $l = 50, 100$ и 150 мм, диаметр трубки $d_t = 10$ мм, давление меняется от 20 до 400 Торр.

Зажигание разряда протекает следующим образом. После установки межэлектродного расстояния между медными электродами приложенное напряжение постепенно повышается, что приводит к электролизу.

При $p = 20$ Торр появляются пузырьки воздуха размером 1–3 мм еще до зажигания разряда. Разряд зажигается быстро, и процесс электролиза короче, чем при атмосферном давлении. При зажигании разряда электролит начинает бурно кипеть, а пузырьки увеличиваются, достигая размеров от 5 до 10 мм. Разряд нестабильный, в основном имеет синий цвет с переходом в желтый. При атмосферном давлении цвет разряда красный и белый. Разряд горит в основном на одном из электродов, редко переходит в середину трубки или на другой электрод. Под действием разряда электролит двигается из стороны в сторону, образуя воздушное пространство. Когда электролит снова касается электрода, возникает пробой и разряд переходит на другой электрод. При этом горит разряд между двумя электродами. Аналогичные явления наблюдаются в работе [2].

Рассмотрим особенности электрического разряда переменного тока в газожидкостной среде с пузырьками воздуха и микроразрядами в 1%-ном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде на основе изучения ВАХ, вольт-секундных и ампер-секундных характеристик. На рис. 1 приведены эти характеристики в диапазоне давления от 20 до 400 Торр. Здесь с 1 по 48 с времени давление составляет 20 Торр, с 50 по 90 с – 40 Торр, с 90 по 130 с – 100 Торр, со 130 по 160 с – 200 Торр, со 170 с до отключения установлено давление 400 Торр. Как видно из рис. 1а, ВАХ, записанная универсальным аналогово-цифровым преобразователем Sensor – CASSY, имеет сложную картину зависимости напряжения от тока разряда. Процесс электролиза соответствует линейно возрастающему участку ВАХ (рис. 1а) от 0 до 0.1 А при напряжении от 7 до 112 В. Далее процесс развития разряда переменного тока при давлении от 20 до 400 Торр в газожидкостной среде с пузырьками воздуха и микроразрядами в 1%-ном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде имеет сложный неустойчивый характер при $l = 50$ мм.

После включения источника питания начинается процесс электролиза как на поверхности

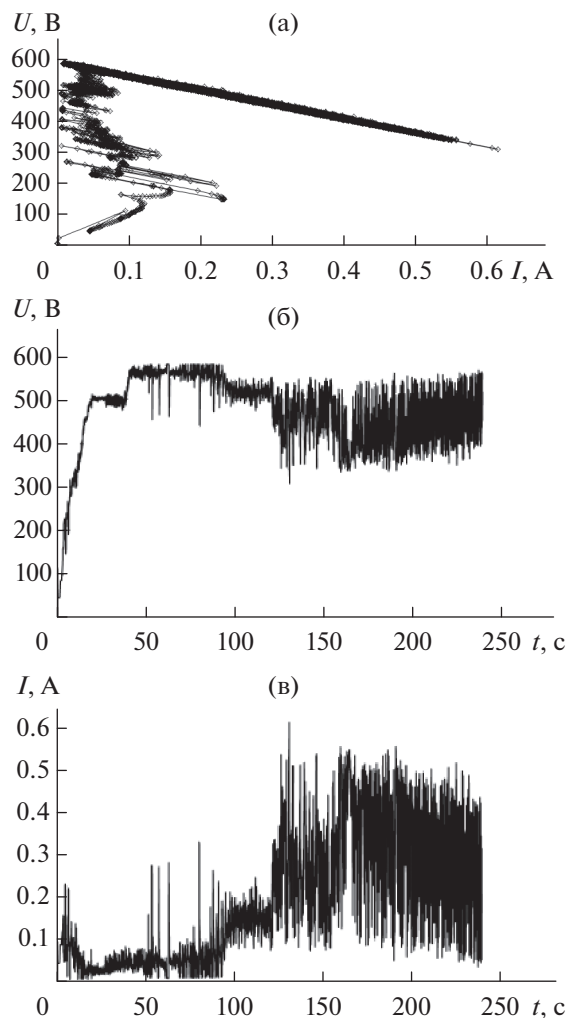


Рис. 1. Вольт-амперная (а), вольт-секундная (б) и ампер-секундная (в) характеристики разряда переменного тока при пониженном давлении 20–400 Торр и $l = 50$ мм.

электродов, так и на внутренней поверхности диэлектрической трубки. Ток и напряжение электролиза составляют $I_3 = 0.05$ А и $U_3 = 50$ В (рис. 1а). После пробоя в пористой среде с пузырьками воздуха начинает гореть разряд на поверхности одного из электродов. Если пузырьки бегают вдоль трубки внутри, то разряд не отрывается от одного электрода. При давлении 20 Торр разряд горит в интервале $I = 0.025\text{--}0.23$ А и напряжение повышается от 150 до 315 В. С ростом давления до 40 Торр напряжение повышается от 500 до 550 В, а ток уменьшается до 0.075 А. Напряжение растет ступенчато с ростом давления от 20 до 40 Торр при $l = 50$ мм. С течением времени от 93 до 127 с при давлении 100 Торр напряжение начинает ступенчато уменьшаться от 550 до 500 В. В интервале 125–230 с напряжение практически остается постоянным $U_{cp} = 450$ В. Зависимость изменения силы тока от времени $I(t)$ повторяет характерные особен-

ности напряжения разряда. При $t = 238$ с аналогово-цифровой преобразователь отключается.

На рис. 2 приведены ВАХ, вольт-секундная и ампер-секундная характеристики при $p \geq 100$ Торр и $l = 150$ мм. Эксперименты были проведены только при давлениях выше 100 Торр. Это объясняется тем, что при давлениях ниже 100 Торр и межэлектродных расстояниях $l = 150$ мм начинает гореть разряд вне трубки в местах присоединения электродов к зажимам.

В данном случае задается время развития разряда 265 с, после истечения этого срока запись автоматически прекращается. ВАХ имеет линейно спадающий характер (рис. 2а). Участок возрастающей ВАХ от 0 до 571 В (при токе от 0.004 до 0.087 А) соответствует электролизу, предшествующему разряду. Напряжение при $l = 150$ мм уменьшается от 600 до 440 В в интервале тока от 0.01 до 0.4 А. Вы-

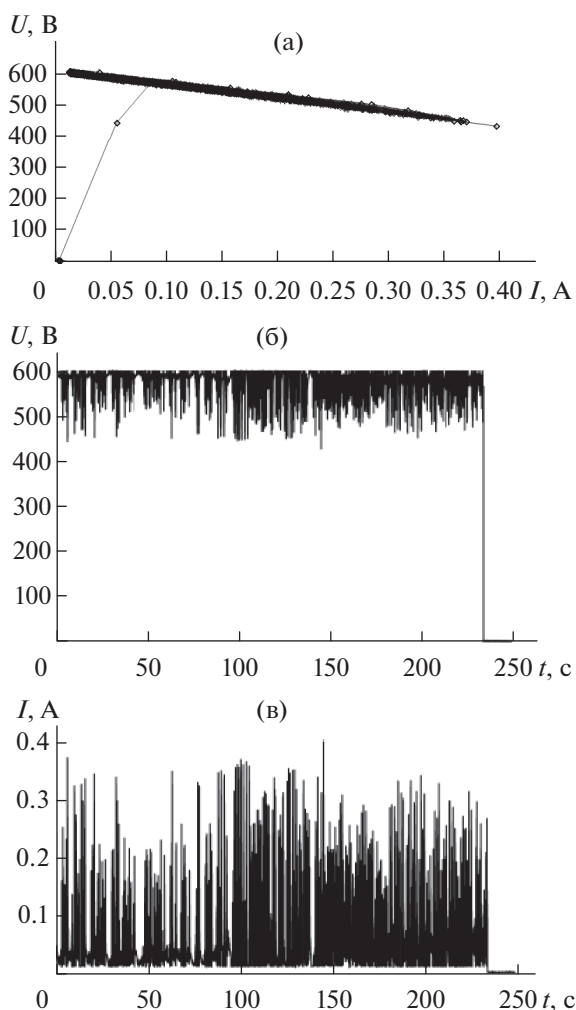


Рис. 2. Характеристики разряда переменного тока при $l = 150$ мм, $p \geq 100$ Торр, время развертки $\Delta t = 265$ с: (а) — вольт-амперная, (б) — вольт-секундная, (в) — ампер-секундная.

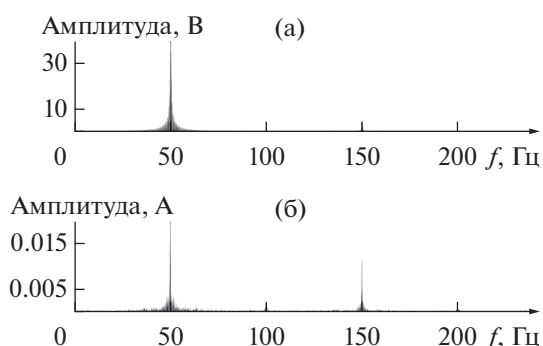


Рис. 3. Спектр напряжения (а) и тока (б) разряда переменного тока при $p = 40$ Торр и $l = 150$ мм в 1%-ном растворе NaCl в дистиллированной воде.

бираем устойчивые режимы работы установки. Из анализа зависимостей $U(t)$ на рис. 2б и $I(t)$ на рис. 2в следует, что в течение 265 с начальные значения напряжения и тока разряда практически остаются неизменными ($U = 600$ В, $I = 0.4$ А), кроме небольших колебаний.

Анализ спектров напряжения (рис. 3а) и тока (рис. 3б) разряда переменного тока в газожидкостной среде с пузырьками воздуха и микроарьядами в 1%-ном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде при пониженных давлениях показал, что в отличие от спектров при атмосферном давлении наблюдается интенсивная линия спектра тока при частотах 50 и 150 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены вольт-амперные, вольт-секундные и ампер-секундные характеристики разряда переменного тока в газожидкостной среде, которые позволяют представить сложную картину взаимодействия пузырьков воздуха различной формы и размеров с разрядом при пониженных давлениях.
2. Установлено, что с понижением давления образуются интенсивные мелкие пузырьки в газожидкостной среде, что приводит к быстрому зажиганию разряда и повышению давления.
3. Обнаружено, что под действием разряда образуется воздушное пространство с микропузырьками. После касания электролита с электродом возникает импульсный разряд между электродами.
4. Выявлено, что чем выше давление и больше межэлектродное расстояние, тем устойчивее горит разряд переменного тока в пористой среде.
5. Установлено, что проводимость газожидкостной среды с пузырьками и микроарьядами существенно зависит от давления.
6. Определены частоты спектра тока и напряжения разряда при пониженных давлениях с помощью преобразования Фурье.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фортос В.Е., Сон Э.Е., Бромберг Л., Гайсин Ф.М., Сон К.Э., О Джон Хе, И Хе Йонг.* Плазменные технологии (на корейском языке). Долгопрудный: Изд-во МФТИ; КОФСТ, 2006. 135 с.
2. *Смирнов Б.М., Бабаева Н.Ю., Найдис Г.В., Панов В.А., Сон Э.Е., Терешонок Д.В.* Пузырьковый метод очистки воды // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 316.
3. *Гайсин А.Ф., Насибуллин Р.Т.* Об особенностях электрического разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 10. С. 959.
4. *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.
5. *Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Абдуллин И.Ш., Мустафин Т.Б., Гайсин А.Ф., Самитова Г.Т., Гайсин А.Ф., Гасимова Л.Ш.* Разряд переменного тока между твердым электродом и электролитом при пониженных давлениях // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 19. С. 298.
6. *Багаутдинова Л.Н., Гайсин А.Ф., Сон Э.Е.* Аномальный тлеющий разряд в электролитической ячейке с твердым электродом при пониженных давлениях // Вестн. Казанск. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. 2012. № 1. С. 101.
7. *Bruggeman P., Degroote J., Vierendeels Y., Leys C.* DC-excited Discharges in Vapour Bubbles in Capillaries Plasma Sources // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. P. 025008.
8. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Мониц А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И., Холоденко В.П.* и др. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ–жидкость при атмосферном давлении и демонстрация ее возможностей для стерилизации // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 12. С. 1142.
9. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Bark Yu.B., Zadiraka Yu.V., Christofi M., Kozlov Yu.N., Kossyi I.A. et al.* Electric Discharge in Water as a Source of UV Radiation, Ozone and Hydrogen Peroxide // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 993.
10. *Самитова Г.Т., Гайсин А.Ф., Мустафин Т.Б., Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Весельев Д.А., Гайсин Ф.М.* Некоторые особенности многоканального разряда в трубке при атмосферном давлении // ТВТ. 2011. Т. 49. № 5. С. 788.
11. *Самитова Г.Т., Гайсин Ал.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М.* Характеристики электрического разряда в трубке с пористым электролитом // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2011. Т. 14. С. 232.
12. *Фахрутдинова И.Т., Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Галимзянов И.И., Гайсин Ф.М., Мирханов Д.Н.* Об особенностях электрического разряда между струйным анодом и металлическим катодом // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 775.
13. *Akhatov M.F., Kayumov R.R., Mardanov R.R., Saifutdinova I.I.* Voltage Drop in the Jet Electrolytic Cathode // J. Phys.: Conf. Ser. LTP Coatings. 2020. V. 1588. 012004.
14. *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.
15. *Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф.* Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 634.