

УДК: 519.633.2

DOI: 10.53816/20753608_2021_4_147

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ ОБЛАСТИ В ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ЗОНЕ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА

NUMERICAL SIMULATION OF THE FORMATION OF A VAPOR-GAS AREA WHEN SWITCHING A CHARGED CAPACITOR AT A LIQUID GAP

По представлению чл.-корр. РАРАН А.И. Михайлина

К.С. Кулаков, В.С. Помазов, И.К. Бородин

АО «НПО Спецматериалов»

K.S. Kulakov, V.S. Pomazov, I.K. Borodin

В статье представлены результаты численного моделирования образования парогазовой области в жидкости. Выполнены сравнения численных результатов с аналитическими и экспериментальными данными. Показана зависимость проводимости раствора от концентрации солей. На основе первого закона Фарадея для электролиза получены количественные данные о продуктах электрохимических реакциях при протекании токов утечки.

Ключевые слова: гидроразряд, проводимость, солёность, электролиз.

The article presents the results of numerical modeling of the formation of a vapor-gas region in a liquid. Comparisons of numerical results with analytical and experimental data are performed. The dependence of the conductivity of the solution on the concentration of salts is shown, on the basis of the first Faraday law for electrolysis, quantitative data on the products of electrochemical reactions with the flow of leakage currents are obtained.

Keywords: hydraulic discharge, conductivity, salinity, electrolysis.

Одной из важнейших задач науки является поиск возможностей трансформации энергии из одних видов в другие. Одним из таких способов является электрический разряд в жидкости. В результате электрического пробоя энергия, запасённая в конденсаторе, преобразуется в энергию ионизации, световую, тепловую, акустическую и механическую. Из-за развития науки и техники электрогидравлический разряд нашел свое применение в промышленности, технологии и медицине [1, 6–10].

Энергия, запасённая в электрическом конденсаторе прямо пропорциональна ёмкости этого конденсатора и прямо пропорциональна квадрату напряжения.

$$E = \frac{CU^2}{2}, \text{ Дж.}$$

Существует несколько способов инициирования электрогидравлического разряда (ЭГР): пробоем жидкостного промежутка и с помощью тонкой инициирующей проволоочки, продукты испарения которой образуют плазменный канал [2]. Второй способ используется в основном для получения мелкодисперсных порошков, но не пригоден для многократного использования в качестве трансформатора энергии. Таким образом, актуальной задачей является построение модели образования парогазовой области, в которой возможно зарождение плазменного канала.

Моделирование является эффективным средством прогнозирования и принятия решений без проведения дорогостоящих экспериментов. В тоже время моделирование, как и любое средство, не является универсальным и требует верификации путем сравнения с данными теоретических расчётов и результатами эксперимента [11, 12].

При образовании газовой области токами утечки большую роль играет солёность и, соответственно, проводимость жидкости, которая меняется от 10^{-4} – 10^{-2} См/см. Для наступления пробоя используют электроды типа «остриё-остриё» [3], способные создать неоднородное высокое электрическое поле и увеличить вероятность электрического пробоя. Чьё значение можно оценить по формуле

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{2l}{r}},$$

где r — радиус кривизны электрода, м; l — межэлектродное расстояние, м; E — модуль напряжённости поля у острия электрода, В/м.

Для верификации была создана схема из постоянного источника напряжением 1000 В и пары электродов в пакете COMSOL, представленная на рис. 1.

Следующий этап проверки модели основывается на сравнении осциллограммы разрядки конденсатора и графика зависимости напряжения на конденсаторе от времени. Для этого на основе данных о концентрации соли и подвижности её ионов [3] была задана удельная проводимость жидкости как функция концентрации

$$k = \sum \alpha \cdot C \cdot (u_+ + u_-) \cdot F,$$

где $F = 96486$ — постоянная Фарадея, Кл/моль; C — молярная концентрация солей в жидкости, моль/м³; $\alpha \approx 1$ — степень диссоциации сильных электролитов.

На рис. 2 представлены данные моделирования разряда конденсатора ёмкостью 40 мкФ и напряжением 10 кВ в жидкости с солёностью 30 г/л.

На рис. 3 видно, что график разрядки конденсатора при численном моделировании схож с данными осциллографических измерений, а резкий спад напряжения говорит о наступлении пробоя и образовании плазменного канала на 200 мкс. Таким образом, последним этапом валидации будет являться моделирование фазового перехода и образования парогазовой области вблизи электродов [13–16].

На рис. 4 представлена зависимость максимальной температуры в среде от времени, наибольшая температура соответствует наибольшей напряжённости поля вблизи остриёв электродов. На рис. 4 видно, что на 80 мкс температура достигает точки кипения.

Из-за высокой удельной теплоты парообразования воды пузырёк пара образуется лишь по прошествии некоторого количества времени. Его эволюцию от зарождения до момента пробоя можно наблюдать на рис. 5.

Помимо пара пузырёк состоит и из других компонентов. В первую очередь связанных с продуктами электролиза [4, 5]. С учетом электро-

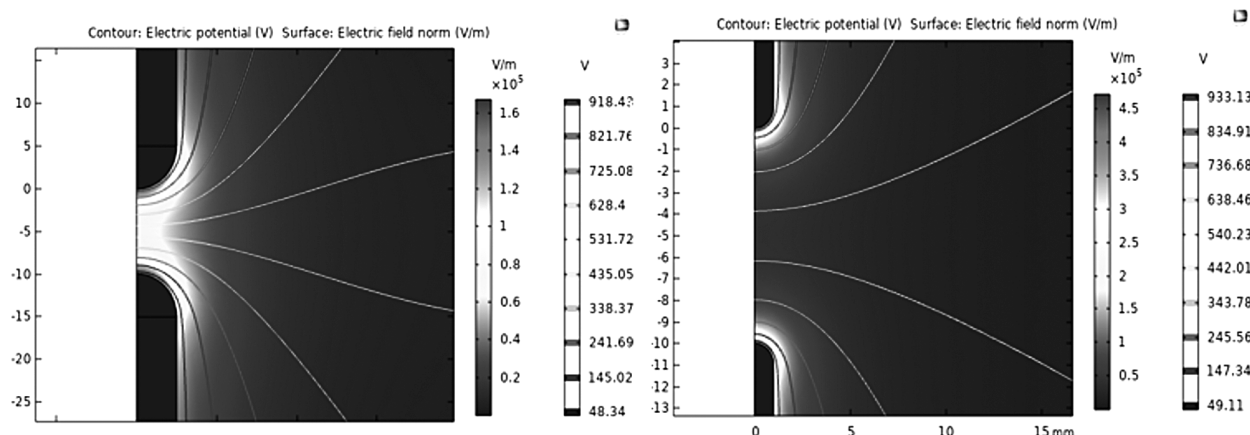


Рис. 1. Распределение поля и потенциала при поданном напряжении 1000 В на две пары электродов на расстоянии 10 мм: $r = 5$ мм (слева) и $r = 1$ мм (справа)

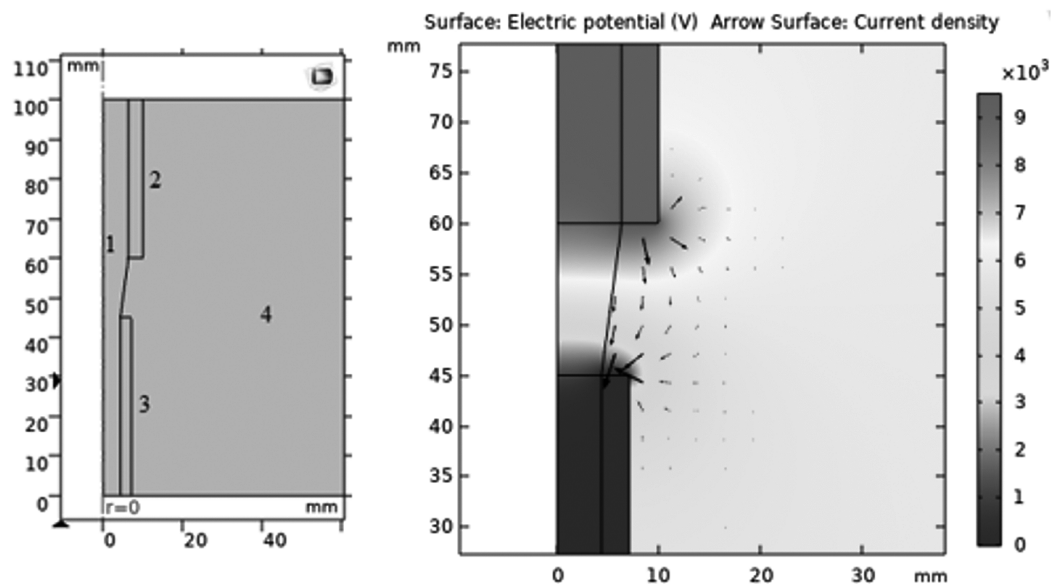


Рис. 2. Геометрия расчётной области (слева): 1 — полимерная основа, 2 — анод, 3 — катод, 4 — морская вода; распределение потенциала и течение тока в момент времени 100 мкс (справа)

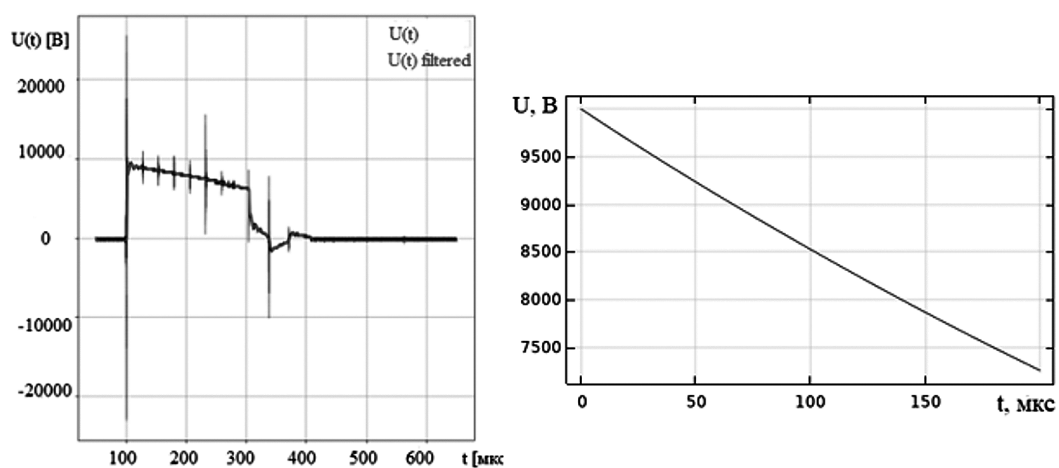


Рис. 3. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени: экспериментальные данные (слева) и численный расчёт (справа)

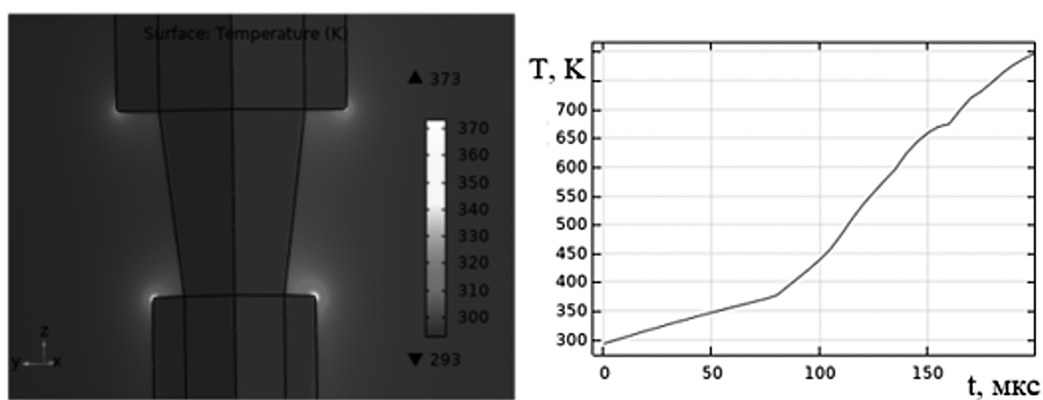


Рис. 4. Распределение температуры в расчётной области

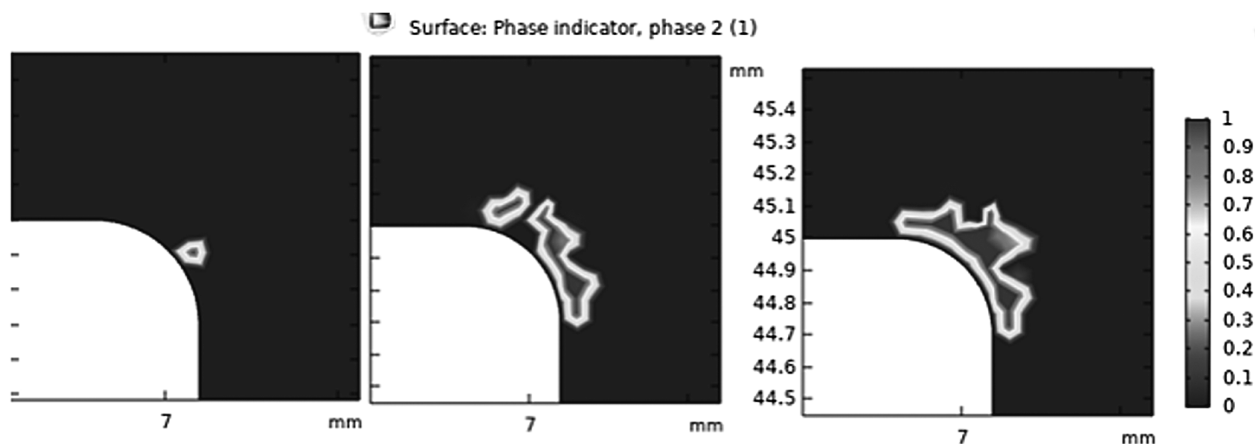
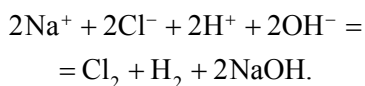


Рис. 5. Пузырёк пара в моменты времени 100, 150 и 200 мкс

химической активности ионов в растворе можно записать итоговое уравнение электрохимических реакций в растворе



С помощью закона Фарадея для электролиза определить количество газа, выделившегося в результате электрохимической реакции.

$$m = M \cdot I(t) \cdot \frac{t}{F \cdot n},$$

где m — масса выделившегося вещества, кг; $I(t)$ — полный ток, А; t — время, с; $F = 96485$ — постоянная Фарадея, Кл/моль; n — валентное число; M — молярная масса, кг/моль.

На рис. 6 представлен график выхода газа до момента пробоя парогазовой области.

Таким образом, моделирование позволяет дать качественную и количественную характери-

стику системе в любой момент времени. Верифицированная модель позволяет делать прогноз в зависимости от многочисленных входных параметров без многочисленных натурных экспериментов.

Выводы

1. Создана верифицированная модель образования парогазовой области при разряде конденсатора в жидкостной промежуток. Численные результаты практически полностью совпадают с экспериментальными: напряжённость электрического поля, графики разряда конденсатора, время зарождения парового пузырька.

2. На основе закона Фарадея и данных о зависимости полного тока от времени была получена количественная оценка продуктов электрохимических реакций, необходимая для расширения пузырьковой теории электрического пробоя в жидкости.

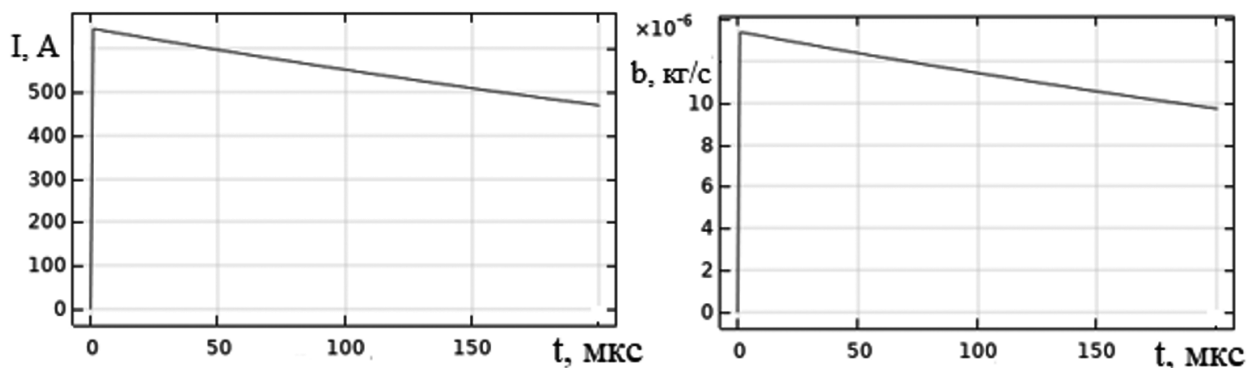


Рис. 6. Значение тока утечки (слева) и выход водорода (справа) до момента пробоя

Литература

1. Юткин Л.А. Электрогидравлическое дробление. — Л. ЛДНТП. Ч 1. 1959. 110 с.
2. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. — М. Наука. 1971. 155 с.
3. Панов В.А. Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. — М.: МФТИ. 2017. 139 с.
4. Коробейников С.М. О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. Предпробойные процессы // ТВТ. 1998. Т. 36. № 8. С. 362–367.
5. Фиошин М.Я., Павлов В.Н. Электролиз в неорганической химии. — М.: Наука. 1976. 106 с.
6. Комельков В. С. Механизм импульсного пробоя жидкостей // ДАН СССР. 1945. Т. 47. Вып. 4. С. 269–272.
7. Комельков В. С. Развитие импульсного разряда в жидкости // ЖТФ. 1961. Т. 31. Вып. 8. С. 948–960.
8. Lesaint O. Prebreakdown phenomena in liquids: propagation ‘modes’ and basic physical properties // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49. №. 14. P. 144001.
9. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / В.Я. Ушаков [и др.]; под ред. В.Я. Ушаков. — Томск: Изд-во НТЛ. 2005. 488 с.
10. Кужекин И.П. Исследование пробоя жидкости в неоднородном поле при прямоугольных волнах напряжения // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 12. С. 2125–2130.
11. Nakao Y., Sakamoto S. Researches on Underwater Spark Discharge // The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan. 1967. Vol. 87. № 944. P. 974–982.
12. Korobejnikov S.M., Yanshin E.V. Model of prebreakdown processes in liquids under pulse voltage // Ninth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. 1987. P. 398–402.
13. Коробейников С.М. О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. Предпробойные процессы // ТВТ. 1998.
14. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2009. С. 736.
15. Куперштох А.Л., Карпов Д.И. Моделирование развития ветвящихся разрядных структур в жидких диэлектриках с учетом импульсной проводимости каналов // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32. Вып. 9. С. 79–86.
16. Бабаева Н. Ю., Найдис Г. В. Моделирование положительных стримеров в жидком аргоне // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. № 3. С. 19–27.