

УДК 533.9+517.2

Обработка результатов технологических экспериментов методом сеток с использованием различных модификаций пароголового разряда

Р.К. Галимова¹, З.Я. Якупов¹

Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н.Туполева – КАИ, г.Казань¹

Аннотация: Инженерная практика (техника и технология) экспериментов с использованием различных модификаций электрических разрядов в паровоздушной среде неразрывно связана с использованием математического аппарата моделирования. Практический интерес представляют результаты исследований процессов обработки жидкостей, твердых металлических или неметаллических поверхностей с использованием подобных разрядов, и возможность обобщения результатов эксперимента для описания технологического процесса. В работе рассмотрена оригинальная методика определения характеристик технологии с использованием различных модификаций электрических разрядов в паровоздушной среде, которую можно использовать в процессах моделирования результатов экспериментов.

Ключевые слова: метод сеток, итерационный параметр, точность расчёта, электрод, электролит, пароголовый разряд, потенциал, напряжение разряда, ток разряда, технологический процесс.

1. Введение

Практический интерес представляют результаты исследований процессов обработки жидкостей, твердых металлических или неметаллических поверхностей с использованием различных модификаций электрических разрядов в паровоздушной среде, и возможность обобщения результатов эксперимента для описания технологического процесса.

Разновидности химической технологии и электротехнологии, с которыми пересекаются процессы с использованием различных модификаций пароголового разряда между твердым металлическим (или жидким неметаллическим) и жидким электродами, связаны с проведением большого количества сложных, затратных по времени экспериментов. Так, например, необходимо учитывать непрерывное изменение характеристик технологической среды, важность контроля параметров технологического процесса (напряжение разряда, сила тока в разрядном промежутке, падение потенциала на поверхности и в объеме электролита, напряженность электрического поля и плотность тока на поверхности электролита), возможность принятия мер по поддержанию их постоянства [1-2]. Инженерную практику (технику и технологию) таких экспериментов невозможно представить без использования аппарата математического моделирования [3].

2. Обоснование выбора метода исследования

Плотность тока на поверхности электролита, и связанная с ней напряженность электрического поля при рассмотрении электрических разрядов в паровоздушной среде, являются основными характеристиками приэлектродной области подобных разрядов. Из-за малых размеров отдельных частей, высокой подвижности и неустойчивости пятна на жидком

электролитическом электроде, задача измерения плотности тока не решена с удовлетворительной точностью. Подавляющее число экспериментальных данных относится ко всему пятну на поверхности электролита, подобно исследованиям катодного пятна электрической дуги между металлическими электродами [4]. Обычно, при исследованиях электрической дуги, между металлическими электродами для измерения плотности тока пользуются двумя методами:

- 1) метод эрозионных следов;
- 2) оптический метод.

При использовании первого метода измеряют ширину следа оплавления на предварительно окисленной поверхности катода, оставленного катодным пятном при его перемещении. Принимается, что область следа совпадает с областью прохождения тока. Этот метод обладает следующими недостатками: а) по ширине следа нельзя судить о форме пятна и его площади; б) размеры эрозионных следов зависят не только от плотности тока и ее распределения по катоду, но и от удельной мощности, поступающей в катод, свойств материала катода и скорости перемещения пятна.

В силу этих причин о точности метода эрозионных следов вообще не возможно судить. Он (метод) может дать как заниженный, так и завышенный результат.

При использовании оптического метода в связи с быстрым перемещением пятна применяют скоростное фотографирование. Определение плотности тока этим методом связано с отождествлением поперечных размеров области прохождения тока с поперечными размерами наиболее ярко светящейся части пятна отрицательного свечения. Этот метод неточен по следующим причинам:

- а) размеры светящегося пятна могут не совпадать с размерами проводящего канала;
- б) плотность тока в области отрицательного свечения может существенно отличаться от плотности тока на самом катоде. Из-за недостаточной временной разрешающей способности оптических систем метод не позволяет получать достоверные результаты.

При исследованиях парогазовых разрядов между твердым металлическим и жидким неметаллическим электродами осредненную плотность тока на поверхности жидкого электрода можно определять как отношение величины тока разряда к площади светящейся области пятна. При этом предполагается, что светящаяся область пятна совпадает с областью прохождения тока. Однако большая подвижность пятна не позволяет точно определить форму и размеры пятна. Кроме того, визуальные исследования электродных пятен на поверхности жидкого электрода с помощью микроскопа показывают, что электродное пятно может быть сплошным или распадаться на точечные пятна различной формы. Размеры светящегося пятна могут не совпадать с размерами проводящего канала. Таким образом, применение этого метода для определения плотности тока на поверхности жидкого электрода позволяет судить очень приблизительно о величине плотности тока.

Работа посвящена расчету следующих величин:

- распределение потенциала в объеме электролита,
- определение компонент напряженности электрического поля и плотности тока на поверхности электролита (на основании экспериментальных измерений распределения потенциала на поверхности электролита и численного метода интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных, путем сведения их к уравнениям в конечных разностях – метод сеток).

3. Схема переменных направлений

Метод сеток применим для описания магнитных и электрических, линейных, нелинейных, неизменных и изменяющихся во времени полей, что позволило использовать его для оценки параметров электрических разрядов в паровоздушной среде. Уравнения

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (1)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (3)$$

записываются в цилиндрической системе координат (по форме электролитической ячейки).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \sigma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

где r – расстояние от центра электролитической ячейки цилиндрической формы круглого сечения;

z – расстояние от поверхности металлического токоподвода на дне электролитической ячейки до поверхности;

\vec{j} – вектор плотности тока;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля;

φ – разность потенциалов.

Уравнение (4) решается при граничных условиях

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \varphi(r, 0) = 0, \quad \varphi(r, h) = f(r),$$

– экспериментально измеренное распределение потенциала на поверхности электролита, где $\varphi(R, z)$, $R \gg h$, h – текущее расстояние по оси z ;

R – внешний радиус цилиндрической ячейки.

Уравнение (4) в конечных разностях:

$$\Lambda_1 \varphi + \Lambda_2 \varphi = 0 \quad (5)$$

$$\Lambda_1 \varphi = (r \varphi_{r-})_r,$$

Λ – разностный оператор;

$$\varphi_{r-} = \frac{\varphi(r, z) - \varphi(r - h_1, z)}{h_1},$$

$$\varphi_r = \frac{\varphi(r + h_1, z) - \varphi(r, z)}{h_1},$$

h_1 – шаг по координате r ;

$$\Lambda_2 \varphi = \frac{r[\varphi(r, z + h_1) - 2\varphi(r, z) + \varphi(r, z - h_2)]}{h_2^2},$$

h_2 – шаг по координате z .

Разностное уравнение (5) решается методом переменных направлений. Итерации начинаются с некоторого начального распределения потенциала φ_0 , полученного экспериментально.

4. Результаты расчётов

Пусть φ_n – распределение потенциала на n -ном шаге итераций. Для внутренних узлов разностной сетки

$$\frac{\varphi' - \varphi_n}{0,5\tau} = \Lambda_1 \varphi' + \Lambda_2 \varphi'_n \quad (6)$$

$$\frac{\varphi_{n+1} - \varphi'}{0,5\tau} = \Lambda_1 \varphi' + \Lambda_2 \varphi_{n+1} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{h_2^2}{4R},$$

где τ – итерационный параметр,

φ' – промежуточное распределение потенциала.

Уравнение (6) решается прогонкой по направлению z относительно φ' , а уравнение (7) решается относительно φ_{n+1} прогонкой вдоль направления r .

Итерации прекращаются при достижении условия

$$\max \left| \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{\varphi_{n+1}} \right| < \varepsilon,$$

где ε – заданная точность расчета: в работе принято $\varepsilon = 0,01$. Использована равномерная прямоугольная сетка по (r, z) с шагом (20×30) .

Для проверки правильности расчетов используется соотношение

$$I = \int_S j_z ds,$$

где I – полный ток разряда,

$$j_z = \sigma E_z,$$

z – компонента плотности тока. Интегрирование производится по поверхности электролита.

С помощью прикладной программы по экспериментально измеренному распределению потенциала по поверхности жидкого электрода $U_\vartheta = f(r)$ при постоянных значениях напряжения разряда U_p и тока разряда I_p рассчитаны зависимости $U = f(r, h)$, $j_z = f(r)$, $E_z = f(r)$, получено распределение эквипотенциальных линий $U_\vartheta = const$.

Распределение компонент плотности тока и напряженности электрического поля по радиусу электролитической ячейки цилиндрической формы круглого сечения имеет колоколообразную форму. С увеличением расстояния от центра разряда компоненты плотности тока и напряженности электрического поля уменьшаются. Характерные зависимости компоненты плотности тока j_z на жидком электроде оттока разряда имеют возрастающий параболический вид.

5. Выводы

Описанная методика определения напряженности электрического поля и плотности тока на поверхности жидкого электролитического электрода в функции параметров технологического процесса с использованием паровоздушного разряда (форма и геометрия электродов, полярность и величина приложенного напряжения, концентрация примесей и температура в объеме электролита и т. д.) рекомендуется для контроля параметров и в моделировании рассматриваемых модификаций технологических процессов.

Литература

1. Галимова Р. К., Юсупова А. Р. Проблема планирования в технологическом эксперименте. Материалы V международной научно-практической конференции "Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки". Северный Чарльстон, США. [Fundamental science and technology - promising developments V. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA]. 2015. vol. 2. pp. 154-156.
2. Галимова Р. К., Зайннеев А. А. Экспериментально-статистическое моделирование технологического процесса. Материалы V международной научно-практической конференции "Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки". Северный Чарльстон, США. [Fundamental science and technology - promising developments V. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA.] 2015. vol. 2. pp. 157-159.

3. Yakupov Z. Ya. About the Hadamard matrices. Science in the modern information society VI. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA, 13-14.07.2015. Vol. 3. pp. 115-118.
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука. 1971.
5. Галимова Р.К., Якупов З.Я. Уравнения эллиптического типа в моделировании технологических процессов // Теория функций, ее приложения и смежные вопросы: Материалы XII международной Казанской летней научной школы-конференции (Казань, 27.06-04.07.2015 г.). – Труды Математического центра им. Н. И. Лобачевского/Казанское математическое общество. Казань: Изд-во Казан. матем. общества, изд-во Академии наук РТ, 2015. Т.51. С. 144-146.
6. Галимова Р. К., Якупов З. Я. Исследование решений уравнения Лапласа в технологических процессах с использованием парогазовых разрядов с жидкостными электродами // Журнал Средневолжского математического общества. 2015. Т. 17, № 1. С. 135–139.

MSC 78M25

Processing of the results of technological experiments by the method of grids using various modifications of the vapor discharge

R.K. Galimova ¹, Z.Ya. Yakupov ¹

KNRTU-KAI named by A.N.Tupolev ¹

Abstract: Engineering practice (engineering and technology) of experiments with using various modifications of electrical discharges in air-steam environment is inextricably linked with the mathematical apparatus of modeling. Practical interest are the results of research of processes of processing liquids, solid metallic or non-metallic surfaces by the use of such discharges, and the possibility of generalization of experimental results to describe the technological process. The paper deals with the original method of determining the characteristics of the technology using various modifications of electrical discharges in the steam-air environment, which can be used in the simulation results of the experiments

Keywords: method of grids, the iterative parameter, the accuracy of the calculation, electrode, electrolyte, gas-vapor discharge, potential, discharge voltage, discharge current, technological process.

References

1. Galimova R. K., Yusupova A. R. [The problem of planning in a technological experiment]. *Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamental'naya nauka i tekhnologii - perspektivnye razrabotki"*. Severnyy Charl'ston, USA. [Fundamental science and technology - promising developments V. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA.] 2015. vol. 2. pp. 154-156.
2. Galimova R. K., Zayneev A. A. [Experimental-statistical modeling of the technological process]. *Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamental'naya nauka i tekhnologii - perspektivnye razrabotki"*. Severnyy Charl'ston, USA. [Fundamental science and technology - promising developments V. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA.] 2015. vol. 2. pp. 157-159.
3. Yakupov Z. Ya. About the Hadamard matrices. *Science in the modern information society VI. Proceedings of the Conference. North Charleston, USA, 13-14.07.2015. Vol. 3. pp. 115-118.*
4. Granovskiy V. L. *Elektricheskiy tok v gaze. Ustanovivshiysya tok. [Electric current in the gas. Steady current]. Nauka Publ., Moscow. 1971. (In Russian)*
5. Galimova R.K., Yakupov Z.Ya. [Equations of elliptic type in modeling of technological processes] // *Teoriya funktsiy, e prilozheniya i smezhnye voprosy: Materialy XII mezhdunarodnoy Kazanskoy letney nauchnoy shkoly-konferentsii [Theory of functions, its applications and related issues: Proceedings of the XII International Kazan Summer Scientific School-Conference] (Kazan, 27.06-04.07.2015). Trudy Matematicheskogo tsentra im. N. I. Lobachevskogo/Kazanskoe matematicheskoe obshchestvo [Proceedings of the Mathematical Center. NI Lobachevsky / Kazan Mathematical Society]. Kazan: Izd-vo Kazan. matem. obshchestva, izd. Akademii nauk RT, 2015. T.51. C. 144-146. (In Russian)*

6. Galimova R. K., Yakupov M. Y. "[Investigation of the solutions of the Laplace equation in processes using steam and gas discharges with liquid electrodes] Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. 2015. vol. 17, no. 1. pp. 135–139. (In Russian)