

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕТА КАПЛИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОЛИТА В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОУЛОВИТЕЛЯ

Гаршин В.И., Лебедев А.Р., Гераськова С.Е.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. В статье показаны соотношения для моделирования неоднородного электрического поля и траектории полета капли гальванического электролита в нем. Оценки носят предварительный характер. Приведены статьи и патенты авторов, в которых неоднородные поля уже используются. Предложен модифицированный траекторный метод для оценки эффективности улавливания капель вредного электролита.

Ключевые слова. Эквивалентный заряд, дипольный момент, капля электролита. гальваническая ванна. электростатическое поле.

SIMULATION OF THE FLIGHT OF A DROP OF GALVANIC ELECTROLYTE IN AN INHOMOGENEOUS FIELD OF AN ELECTRIC CATCHER

Garshin, V.I., Lebedev A.R., Geraskova S.E.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Annotation. The article shows the relations for modeling an inhomogeneous electric field and the flight path of a drop of galvanic electrolyte in it. Estimates are preliminary. Articles and patents of authors in which non-uniform fields are already used are given. A modified trajectory method is proposed for evaluating the effectiveness of trapping harmful electrolyte droplets.

Keyword. Equivalent charge, dipole moment, a drop of the electrolyte. galvanic bath. electrostatic field.

Экологизация гальванического производства может быть осуществлена двумя путями: очисткой или утилизацией сточных вод и подавлением уноса вредных аэрозолей в воздух рабочей зоны. Решение первой части проблемы – выделение и утилизация ценных материалов из сточных вод, утилизация шламов, очистка воды до норм для повторного использования в различных целях. Решение второй части проблемы возможно путем электроулавливания и возврата в ванну выбрасываемых аэрозолей, использования других механизмов подавления выбросов (пены, жидкие пленки, сетки, лабиринты и др.).

Имеется достаточно информации о технической реализации задачи ограничения выброса гальванических аэрозолей в воздушную среду, приближающей нас к ее комплексному решению [8]. Однако, в данной статье наше внимание обращено на повышение эффекта улавливания путем использования возможностей электростатического поля.

Данной статье предшествовало несколько экспериментальных и теоретических работ [1,2,3]. Известна фундаментальная закономерность капельного уноса при барботаже жидкостей газом. В ней режим максимального капельного уноса сменяется режимом пенной защиты. Известно также, что специфическая адсорбция ионов на границе жидкость-газ приводит к разделению ионов, что обеспечивает при барботаже выбрасываемым в воздушное пространство каплям «собственный» заряд.

При разработке электроуловителей важно знать механизм возникновения и величину заряда капель, выбрасываемых из гальванических ванн. В работе [3] описан разработанный Гаршиным В.И. метод косвенного измерения заряда барботажных капель. Заряд капли, выбрасываемой с поверхности электролита при разрыве одиночного газового пузыря, вычисляли по экспериментальным данным ее траектории в однородном электростатическом поле и использовали в работе [1] для расчета простейшего электроуловителя.

Однако, известно, что в неоднородном электрическом поле электронеутральные в целом капли поляризуются, приобретая дипольный момент. В таком случае сила, действующая на каплю, может быть вычислена по формуле

$$|F| = q_{\text{св}} \cdot E + p \cdot \text{grad } E, \quad (1)$$

где $q_{\text{соб}}$ - собственный заряд капли, E - напряженность электрического поля в точке полета капли, p - дипольный момент капли, $\text{grad}E$ - градиент напряженности электрического поля. Поляризованная капля движется в сторону более сильного поля.

Но при этом остается нерешенным вопрос о соотношении собственного и индукционного заряда капли, что может иметь значение при вычислении силы, действующей на поляризованную каплю в неоднородном электрическом поле.

Этот факт был положен в основу изобретения электроуловителя [2], в котором основным признаком новизны было применение концентратора поля на одном из электродов.

После оценки вклада собственного заряда в сравнении с вкладом индукционного (дипольного момента) величиной первого можно было пренебречь, а в расчетах при моделировании пользоваться понятием эквивалентный заряд.

Более подробно начальная стадия исследований в этой области описана в диссертации [3], где последующие исследования проводились в соответствии с современной тенденцией «не очищать окружающее пространство, а подавлять загрязнения в месте их появления». Таким образом появилось название надповерхностный электроуловитель (НЭУ) гальванических аэрозолей [4]. А в патенте [5] к этому названию прибавилось слово «многофункциональный» (МНЭУ), так как он обеспечивал высокую эффективность, за счет экономии энергии и возврата электролита в ванну, локальность и управляемость процесса улавливания.

В стремлении добиться максимальной эффективности подавления вредных выбросов из гальванической ванны были испытаны, кроме электроулавливания, другие механизмы: инерционный, пенный, пленочный. Проведено также моделирование эффективности инерционного механизма для электродной системы без подключения электрического поля [6].

В дальнейшем нами осуществлено моделирование эффективности электроулавливающего действия методом планирования эксперимента [7]. Заряд брали из опытной зависимости вида $q=ar^b$, где r – радиус капли (м), которую перепроверяли многократно, и после обработки большого массива путем статистического моделирования была получена следующая таблица

Таблица 1 - Статистические модели зависимости заряда капли от ее радиуса r (м)

Зависимости	Заряд капли, Кл	Коэффициент корреляции
1	$q=0,0078r^{2,931}$	0,997
2	$q=0,0012r^{2,833}$	0,989
6	$q=0,0017r^{2,848}$	0,995
10	$q=0,0034r^{2,960}$	0,998
12	$q=0,0047r^{2,975}$	0,981
14	$q=0,0012r^{2,652}$	0,994
15	$q=0,0026r^{2,783}$	0,993

Знание этой зависимости весьма важно для осуществления моделирования процессов и устройств МНЭУ гальванических аэрозолей. Имеется опыт моделирования таких процессов в среде однородного электростатического поля [13]. Дальнейшие исследования показали, что наиболее перспективной является модель электроуловителя в неоднородном поле. Первое изобретение [2] в этом направлении уже базировалось на применении неоднородного поля.

Первоначальные сведения о характере электроулавливания капель легли в основу создания комбинированных моделей МНЭУ [8, 9], где сочетаются механизмы инерционный и электростатический.

Траекторный метод, основан на использовании фундаментальных уравнений динамики полета капли в гравитационном и однородном электрическом полях. Ранее было сказано, что для расчета электроуловителей необходимо знать электрический заряд капли. Несмотря на то, что фактически в неоднородном поле движется поляризованная капля с некоторым дипольным моментом, расчеты показывают, что можно при отсутствии собственного заряда пользоваться понятием эквивалентный заряд $q_{\text{экв}}$. Тогда второе слагаемое формулы (1) можно заменить выражением

$$|F| = q_{\text{экв}} \cdot E_{\text{лок}} \quad (2)$$

где $E_{\text{лок}}$ – локализованная напряженность в текущей точке траектории полета капли.

Целью настоящей работы является подготовка теоретической и экспериментальной базы для моделирования эффективности процесса улавливания капель элементарной ячейкой с неоднородным электрическим полем. Параметры поля, ячейки (элементарное звено многополюсного электроуловителя) и капель брали в пределах, приближенных к реальным, полученным ранее на опытных установках типа [11, 12].

Объектом моделирования является электрическое поле между двумя взаимно перпендикулярными плоскими электродами: один – создавал приблизительно однородное поле, другой

электрод ориентирован лезвием к первому. Допускается, что с некоторой малой ошибкой можно считать заряд поляризованной пластины сосредоточенным на острие лезвия. Тогда возможно также приближенно лезвие заменить достаточно длинной, равномерно заряженной нитью. В обоих случаях краевым эффектом на концах пластин пренебрегаем. Примем для дальнейшего изложения следующие термины: электрод–плоскость (ЭП) и электрод–нить (ЭН).

Для определенной выше пары электродов в соответствии с принципом суперпозиции напряженность поля в зазоре можно вычислить с малой погрешностью по формуле

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\tau}{2\pi(a-x)\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где σ - поверхностная плотность заряда электрода ЭП, τ - линейная плотность заряда ЭН, a - межэлектродный зазор, x - расстояние от нити до наблюдаемой точки поля, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная.

Первое слагаемое описывает однородное поле ЭП, второе - неоднородное (полурadiaльное) поле от ЭН. Исходные величины σ и τ подбираются для реальной электродной системы исходя из условия, при котором рабочая напряженность $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^4$ В/м поля берется на два порядка меньше пробивной для сухого воздуха $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6$ В/м. На рис. 1 показан характер распределения напряженности для электродной конструкции с зазором $a = 0.025$ м.

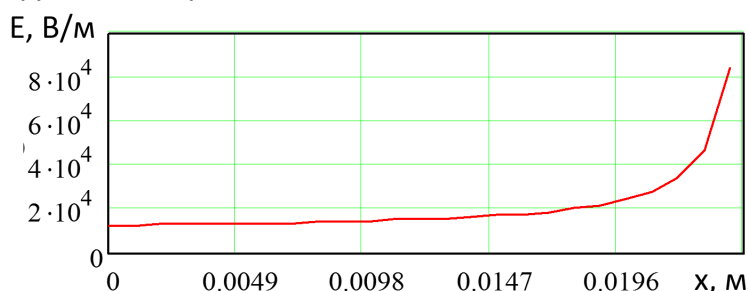


Рисунок 1 – Зависимость напряженности E в зазоре от координаты x.

Такие и более сложные поля описываются методом конформного отображения. В работе [10] для подобной электродной конструкции получено аналитическое решение, в котором геометрия неоднородного электростатического поля в плоскости координат x - y отображается с помощью уравнений

$$\begin{aligned} x(u, v) &= a \cosh\left(\frac{\pi v}{2U_0}\right) \sinh\left(\frac{\pi u}{2U_0}\right) \\ y(u, v) &= a \sinh\left(\frac{\pi v}{2U_0}\right) \cosh\left(\frac{\pi u}{2U_0}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

где u и v - параметры конформного отображения, полученные обратным преобразованием, определяемым для нашей электродной системы как

$$u = \frac{U_0}{0.0342 \cdot a^{0.0006}} \left(x - \frac{y}{3}\right); \quad v = \frac{u}{2} \quad (5)$$

где U_0 - напряжение в межэлектродном зазоре. На рис. 2 показана геометрия силовых и эквипотенциальных линий неоднородного электростатического поля при $a = 0,025$ м и $U_0 = 120$ В.

В каждой точке полета капли необходимо знать направление действующей силы со стороны поля. Для этого определим α - угол наклона силовой линии к оси x по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right). \quad (6)$$

Таким образом, известный ранее траекторный метод расчета координат точек полета заряженной капли может быть модифицирован с учетом действия силовых линий неоднородного поля по формулам

$$X(t) = x_0 + \frac{qE}{m} \frac{t^2}{2}$$

$$Y(t) = y_0 + (V_0 - Cr)t - \frac{gt^2}{2} + \Delta x \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

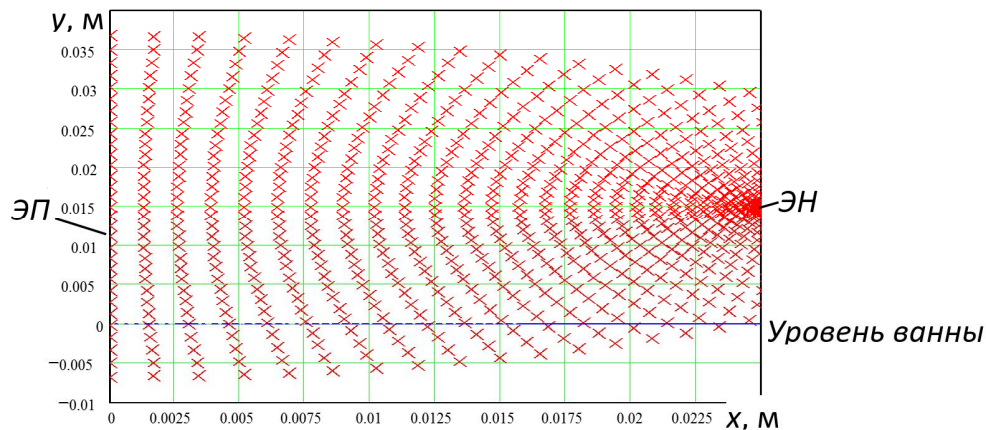


Рисунок 2 - Модель неоднородного электростатического поля в межэлектродном зазоре МНЭУ

В каждой точке полета капли необходимо знать направление действующей силы со стороны поля. Для этого определим α - угол наклона силовой линии к оси x по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right). \quad (6)$$

Таким образом, известный ранее траекторный метод расчета координат точек полета заряженной капли может быть модифицирован с учетом действия силовых линий неоднородного поля по формулам

$$X(t) = x_0 + \frac{qE}{m} \frac{t^2}{2}$$

$$Y(t) = y_0 + (V_0 - Cr)t - \frac{gt^2}{2} + \Delta x \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

где x_0 y_0 – начальные координаты траектории полета капли. C – константа, зависящая от сопротивления воздушной среды [13]. Δx – расстояние по оси x , которое капля пролетает за время Δt (заведомо малая величина) от предыдущего положения.

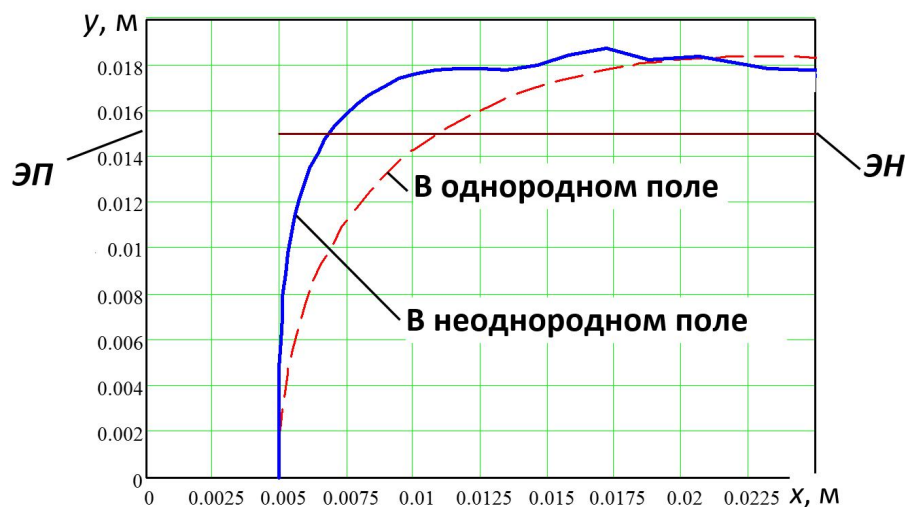


Рисунок 3 - Модель полета одной капли

Из рис.3 видно, согласно предложенной модели полета капли в неоднородном поле (7) траектория полета по сравнению с чисто траекторным методом изменяется так, что вблизи электрода

ЭН наблюдается существенное влияние силовых линий поля, а это приводит к целенаправленному движению капли в сторону остря.

Выводы. В статье проведены подготовительные операции по интерпретации геометрии неоднородного электрического поля в зазоре между двумя взаимно перпендикулярными плоскими электродами.

Следующей задачей исследований может быть построение траекторий полета массива капель со стохастически распределенными параметрами: начальных координат, размера, массы и заряда. Информация для дальнейшего моделирования получается путем многократного чередования по схеме: «опыт – модель – опыт».

Список литературных источников

1. Гаршин В.И., Жадан А.И., Ватутин Н.В. Об электрофильтрации аэрозолей капельного выброса над гальваническими ваннами // Повышение эффективности и экологии систем отопления и вентиляции/ РИСИ, Ростов н/Д., 1984. — С. 75—79.

2. Гаршин В.И., Медиокритский Е.Л., Вишневецкая А.Н., Жадан А.И., Фомин И.М., Гапонов В.Л. Устройство для улавливания жидких аэрозолей. Патент RU №2050979 МКИ 6В3С3/16. Заявл.7.09.92. Оpubл.27.12.93-Б.И.-1995.- №36. —37 с

3. Гаршин, В.И. Исследование процессов электроулавливания вредных веществ, выделяемых в воздушную среду гальванических цехов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, — 1995. — 17 с.

4. Гаршин В.И. Надповерхностные уловители гальванических аэрозолей как эффективное средство защиты окружающей среды и энергоресурсосбережения // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: Межвуз. сб. науч. тр. Вып.2 / РГАСХМ, Ростов н/Д., 1998. — С.97—99.

5. Патент на полезную модель RU № 80129 U1 Многофункциональный надповерхностный уловитель./ Гаршин В.И., Гапонов В.Л., Вольф Е.А., Поршнева С.Е., Харченко В.А., Чередниченко О.П.. Заявл. 22.03.2007. Оpubл. 27.01.2009. Бюл. № 3.

6. Лебедев А.Р., Гаршин В.И., Гераськова С.Е. Влияние конструкционных параметров электроуловителей на эффективность подавления капельного уноса из гальванических ванн// Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2019): материалы ХУ Международной научно-технической конференции/ Уфимск. Гос. Авиац. Техн. Ун-т. — Уфа: РИК УГАТУ, 2019.- С.86-92.

7. Гаршин В.И., Лебедев В.Л., Гераськова С.Е., Гапонов В.Л., Статистическое моделирование процессов и устройств электроулавливания гальванических аэрозолей. Техносферная безопасность, надежность, качество, энергосбережение // Материалы Международной научно – практической конференции. Выпуск XIV. Т. 1. Ростов–н/Д: Ростовский государственный строительный университет,2012.- С. 102 – 110.

8. Пат. на полезную модель. Устройство улавливания гальванических и других барботажных жидких аэрозолей. // Гаршин В.И., Гапонов В.Л., Харченко В.А., Вольф Е.А., Багринцева С.О., Гераськова С.Е./ № 91896 Российская Федерация, МПК В03 С3/16. - № 2009107259/22; заявл. 27.02.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 7

9. Электроуловитель гальванических аэрозолей: патент на полезную модель 117832 Рос. Федерация В03С 3/02 / В.И. Гаршин, В.Л. Гапонов, С.Е. Гераськова, О.П. Чередниченко, А.В. Бакланова -№2011152587/03, Заявл. 22.12.2011, опубл.10.07.2012, Бюл. №19- 4с.

10. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Часть 1 М.-Л. Госэнергоиздат1951.- 292 с.

11. О путях реализации оптимальной системы улавливания капельного уноса в гальваническом производстве / В.Л. Гапонов [и др.] // Качество и жизнь. — 2016. — №4(12). — С.89 – 92.

12. Гаршин В.И., Гераськова С.Е., Лебедев А.Р., Рамзаев А.В., Чередниченко О.П. Устройство автоматического зондирования параметров капельного уноса из гальванических ванн (патент № 184403, опубликовано: 24.10.2018 Бюл. №30)

13. Гаршин В.И., Лебедев А.Р., Гераськова С.Е. Программа моделирования процесса электроулавливания капельного уноса при гальванопокрытии деталей// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019664417, заявл.26.10.19; опубл.06.11.19, Бюл.№.11.

Работа выполнена в соответствии с планом госбюджетной НИР.