

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В СРЕДЕ, ОГРАНИЧЕННОЙ ТОКОПОДВОДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ, РАЗДЕЛЕННЫМИ МЕМБРАНОЙ

Заяц Е.М.¹, д.т.н., профессор, Кривовязенко Д.И.¹,

Янко М.В.¹, Чорный А.Д.², к.ф.-м.н., доцент

¹БГАТУ, ²ИТМО НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Электротермохимическая обработка органических дисперсных гидросистем (ОГС), к которым мы относим продукты сельскохозяйственного производства растительного и животного происхождения, связана с изменением температуры.

Электрический ток, протекая через среду, нагревает ее. Во всех случаях повышение температуры – это увеличение энергоемкости процесса, что нежелательно. Более высокая температура у поверхности токоподводящих электродов, разделительной мембраны может ухудшить качество обработки или вообще затруднить токоподвод к среде.

Поскольку обычно ОГС обрабатывают при относительно небольших напряженностях поля и достаточно больших межэлектродных расстояниях, то изменение температуры в ОГС можно в достаточно хорошем приближении рассмотреть на основе омической модели проводимости [1]. Также, исходя из малости скорости диффузионного и конвективного переноса заряда по сравнению со скоростью миграции ионов в ОГС за счет приложенного электрического поля, уравнение полного тока в ОГС имеет вид

$$\nabla(\sigma E) = \nabla(\sigma \nabla \Phi) = 0 \quad (1)$$

Температуру дисперсной гидросистемы определяют из уравнения конвективной теплопроводности с учетом вклада омического нагрева:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + \sigma E^2$$

с начальными $T|_{\tau=0} = T_0$ и граничными условиями $\lambda \nabla T|_{\Gamma} = \alpha(T_{env} - T|_{\Gamma})$, где λ , ρ , C_p – теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость дисперсной среды, \vec{u} – вектор скорости, α – коэффициент теплоотдачи на границе Γ , T_0 – начальная температура, T_{env} – температура окружающей среды, $T|_{\Gamma}$ – температура среды на границе, σ – удельная электропроводность среды, E – напряженность электрического поля, Φ – электрический потенциал.

Решение уравнения (1) применительно к реакторам в виде плоского и коаксиального канала со стенками, представляющими электроды, приведено в [2]. В настоящей работе рассматривается плоская электродная система, токоподводящие поверхности которой разделены мембраной на анодную и катодную области (Рис. 1).

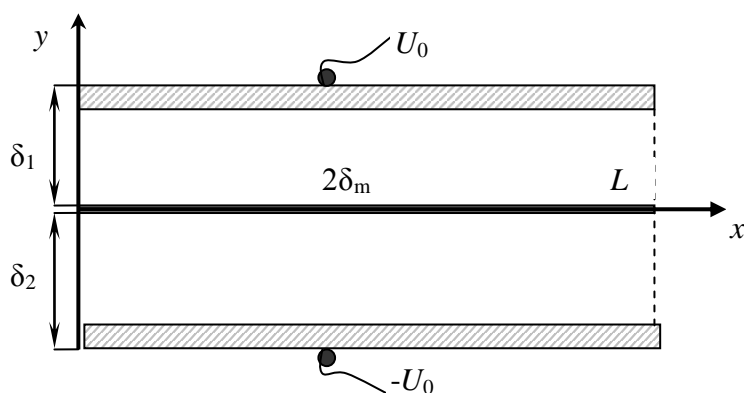


Рисунок 1 – Плоская электродная система с разделительной мембраной.

Среда может перемещаться прямооток и противоток. Электрический ток протекает от одного электрода к другому через среду и мембрану. Температура в среде и мембране из-

меняется от начального до какого-то конечного максимального значения, заданного технологическим процессом. При этом температура мембраны не должна превышать предельную допустимую для обрабатываемого материала. Для такого диапазона температуры наблюдается слабая зависимость от нее тепло- и электрофизических параметров среды и мембраны и можно принять их постоянными.

Для установившегося потока среды в межэлектродном пространстве с относительными размерами, такими как $\delta_1 / L \gg 1$ и $\delta_2 / L \gg 1$, оценку состояния среды по длине канала можно произвести в приближении пограничного слоя как для температурного, так и электрического полей:

$$\frac{\partial}{\partial y}(\sigma(y)E_y) = -\frac{\partial}{\partial y}\left[\sigma(y)\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right] = 0, \quad (2)$$

$$\text{для среды: } \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \sigma E^2 \quad (3)$$

$$\text{для мембраны: } 0 = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \sigma_m E^2 \quad (4)$$

Граничные условия на входе в канал для $T = T_0$, тогда как на выходе из канала «мягкое» граничное условие: $\partial T / \partial x|_{x=L} = 0$. Для случая противотока следует учитывать, что эти границы для анодной и катодной частей противоположно расположены относительно друг друга. На стенках канала (электроды) справедливы условия Ньютона для теплового потока

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=\delta_m+\delta_1} = \alpha_1(T_{env} - T|_{y=\delta_m+\delta_1}), \quad \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=-(\delta_m+\delta_2)} = -\alpha_2(T_{env} - T|_{y=-(\delta_m+\delta_2)}).$$

Коэффициенты теплоотдачи α_i [Вт м⁻²К⁻¹] от нагреваемой жидкости к окружающей среде в катодной и анодной зонах определим через числа Нуссельта как $\alpha_i = Nu_i \lambda_i / \delta_i$ [3, 4]. В рассматриваемом типе каналов для ламинарного режима движения жидкости $Nu_i = 7.54$, а для турбулентного режима воспользуемся формулой $Nu_i = 0.0155 Pr_i^{0.5} Re_i^{0.83}$, справедливой для жидкостей с числом Прандтля $1 < Pr_i < 25$ [4].

С учетом граничных условий на электродах для потенциала ($\Phi|_{y=\delta_m+\delta_1} = U_0$, $\Phi|_{y=-(\delta_m+\delta_2)} = -U_0$) и условия непрерывности тока на границе среды с мембраной ($y = \delta_m$ и $-\delta_m$) можно показать, что решением уравнения (2) является зависимость:

$$E(y) = \frac{2U_0}{\sigma(y)\left[\frac{\delta_1}{\sigma_1} + \frac{2\delta_m}{\sigma_m} + \frac{\delta_2}{\sigma_2}\right]} \quad (5)$$

Здесь электропроводимость σ является функцией от y , потому что изменяется в зависимости от электропроводимости среды, движущейся над мембраной и под ней, а также электропроводимости самой мембраны (σ_1 , σ_2 , σ_m , соответственно). Подстановка формулы (5) в формулу для количества тепла, выделяемого единицей объема, в уравнении (2) для температуры дает:

$$Q(y) = \sigma E^2 = \frac{(2U_0)^2}{\sigma(y)\left[\frac{\delta_1}{\sigma_1} + \frac{2\delta_m}{\sigma_m} + \frac{\delta_2}{\sigma_2}\right]^2}$$

Используя интегроинтерполяционный метод [5] для нахождения температуры, осредненной по толщине каждого из каналов и мембраны, из уравнений (3) и (4) получаем следующую систему уравнений:

$$\text{для среды над мембраной: } \rho_1 C_{p1} u_1 \delta_1 n_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = K_1(T_m - T_1) + K_{1env}(T_{env} - T_1) + \sigma_1 E_1^2 \delta_1,$$

для среды под мембраной: $\rho_2 C_{p2} u_2 \delta_2 n_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = K_2 (T_m - T_2) + K_{2env} (T_{env} - T_2) + \sigma_2 E_2^2 \delta_2$,

для мембраны: $0 = K_1 (T_1 - T_m) + K_2 (T_2 - T_m) + \sigma_m E_m^2 2\delta_m$. (6)

Здесь среднерасходная скорость в каналах определяется как $u_{1,2} = Q_{1,2} / S_{1,2}$, где $Q_{1,2}$ - объемный расход среды в канале, $S_{1,2}$ - проходное сечение канала, $n_{1,2}$ - индексы направления движения среды ($n_{1,2} = 1$ - вдоль оси x , $n_{1,2} = -1$ - противоположно оси x), индексы 1, 2, m указывают на параметр в рассматриваемой области.

Коэффициенты теплоотдачи $K_{1,2} = (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + 2\delta_m/\lambda_m)^{-1}$, $K_{1env} = (1/\alpha_1 + 1/\alpha_{env} + \delta_{1e}/\lambda_{1e})^{-1}$, $K_{2env} = (1/\alpha_2 + 1/\alpha_{env} + \delta_{2e}/\lambda_{2e})^{-1}$, где $\delta_{1,2e}$ и $\lambda_{1,2e}$ - толщина и теплопроводность материала электрода, α_{env} - коэффициент теплоотдачи от поверхности электродов в помещение (примем равным $\alpha_{env} = 8$ Вт/м²К).

Из определения коэффициентов $K_{1,2}$ и уравнения (6) следует, что температура мембраны равна:

$$T_m = \frac{K_1}{K_1 + K_2} T_1 + \frac{K_2}{K_1 + K_2} T_2 + \frac{\sigma_m E_m^2 2\delta_m}{K_1 + K_2}.$$

Таким образом, для нахождения изменения температуры среды необходимо решить систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\rho_1 C_{p1} u_1 \delta_1 n_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{K_2 K_1}{K_1 + K_2} \left(T_2 - T_1 + \frac{\sigma_m E_m^2 2\delta_m}{K_2} \right) + K_{1env} (T_{env} - T_1) + \sigma_1 E_1^2 \delta_1, \quad (7)$$

$$\rho_2 C_{p2} u_2 \delta_2 n_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \left(T_1 - T_2 + \frac{\sigma_m E_m^2 2\delta_m}{K_1} \right) + K_{2env} (T_{env} - T_2) + \sigma_2 E_2^2 \delta_2. \quad (8)$$

Для системы уравнений (7)–(8) может быть найдено общее решение с помощью отыскания корней характеристического уравнения и метода вариации произвольной постоянной [6].

В настоящей работе решение приведено для конкретной ОГС (при получении белка из молочной сыворотки). Согласно параметрам коагуляции белков молочной сыворотки $Pr_i = \mu_i C_{pi} / \lambda_i \approx 5$.

Для заданных параметров обработки в случае проточного движения среды в каналах ($n_1 = n_2 = 1$) аналитическим решением уравнений (7)–(8) являются функции:

$$T_1 = -1141.524 \exp(-0.00213x) - 12.799 \exp(-0.01123x) + 1447.322, \quad (9)$$

$$T_2 = -1137.392 \exp(-0.00213x) + 12.845 \exp(-0.01123x) + 1417.547. \quad (10)$$

В случае противотока ($n_1 = -n_2 = 1$) решением являются следующие функции при длине каналов $L = 1$ м:

$$T_1 = -310.824 \exp(0.00491x) - 843.498 \exp(-0.00488x) + 1447.322, \quad (11)$$

$$T_2 = -790.678 \exp(0.00491x) - 331.5896 \exp(-0.00488x) + 1417.547; \quad (12)$$

при длине каналов $L = 0.5$ м:

$$T_1 = -205.207 \exp(0.00491x) - 842.969 \exp(-0.00488x) + 1447.322, \quad (13)$$

$$T_2 = -792.025 \exp(0.00491x) - 331.381 \exp(-0.00488x) + 1417.547. \quad (14)$$

Изменение температуры в мембране:

$$T_m = 0.5(T_1 + T_2) + 5.98935. \quad (15)$$

Численное решение (9)-(15) дает значение температуры вдоль поверхности электродов и мембраны для прямого движения и противотока. Определяет выбор материала мембраны и длины электродов, дает информацию, способствующую исключению перегрева среды.

Литература

1. Жакин А. И. Электродинамика. УФН. 2012. Т. 182. С. 495–520.
2. Заяц Е.М. Основы электротермохимических методов обработки влажных кормов. Мн.: Ураджай, 1997. – 216 с.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 366 с.
4. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. М.: Энергия, 1972. – 448 с.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. – 616 с.
6. Бронштейн И.И., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1967. – 608 стр.

УДК 621.313.33

**О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ
ЗАЩИТ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Иванов Д.М., Равинский Н.А.
БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь

На производственных и сельскохозяйственных предприятиях наибольшее применение находят асинхронные трехфазные электродвигатели. Надёжность их работы влияет на весь технологический процесс. Даже если электроприводы спроектированы и эксплуатируются со всеми технологическими нормами и требованиями, при их работе всегда остаётся вероятность возникновения аварийных режимов или режимов, которые характеризуются ненормальной работой.

По данным, приведенным в [1], среди причин отказов электродвигателей, наибольшее их количество приходится на заклинивание ротора (29,7 %), неполнофазный режим (15,9 %), перегрузку (9,9 %), и т. д. Примерно такие же данные приведены в [2]. На животноводческих комплексах среди причин отказов электродвигателей на первое место выходят воздействия агрессивных сред (18,75 %) и низкая чувствительность защиты (18,75 %), далее следуют вибрация (15,63 %), износ подшипника (11,73 %), перегрузки (7,81 %), заклинивания рабочей машины (3,13 %), загрязнения, воздействия пыли и работа при повышенной температуре (6,25 %) и т. д. [3].

Как известно, невозможно обеспечить полную защиту электродвигателя от всех аварийных режимов и состояний путем контроля всего лишь одного параметра [4]. При этом, контроль наибольшего числа аварийных режимов могут обеспечивать такие показатели, как ток и температура [3], поэтому в основе комплексных защит электродвигателей, защищающих от нескольких аварийных состояний, лежит контроль именно этих параметров.

Наиболее простыми являются электронные комплексные защиты, которые имеют проходные датчики тока, например, устройства СиЭЗ-4А, СиЭЗ-8-25, СиЭЗ-20-80 производства НПП «БИНАР». Они позволяют защищать асинхронные двигатели по следующим параметрам аварийных режимов [5]:

- обрыв фазы;
- увеличение тока двигателя сверх номинального рабочего значения из-за электрических или технологических перегрузок;
- заторможение (заклинивание) ротора двигателя;
- короткое замыкание.

Однако, вышеприведенные устройства защиты имеют основных 3 недостатка:

- позволяют включать электродвигатель на заведомо неполнофазную сеть;