

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОРМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

В. С. Корко, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ)

Аннотация

Получены зависимости, описывающие температурное поле в электродной камере, кинетику нагрева дисперсной проводящей среды, рассмотрены особенности термического действия электрического тока при обработке корма.

Введение

Обработку кормовых материалов (зерна, соломы, мелассы и др.) с целью повышения переваримости питательных веществ, улучшения других качеств осуществляют в электродных камерах с использованием переменного или постоянного тока [1,2,3]. Происходящие деструктивные процессы, имеющие физико-химическую природу, изменяют структуру и свойства компонентов корма, обеспечивают улучшение кормового достоинства. В силу особенностей рассматриваемых технологий и явлений, изменчивости в течение времени обработки свойств органических материалов, недостаточной изученности каждого вида воздействий электрического тока представляет интерес получить математические модели термического процесса электротехнологической обработки, используемые для исследования и расчета электрических аппаратов и устройств.

Основная часть

Для анализа особенностей термического проявления электрического тока рассмотрим процесс электрогидротермической обработки фуражного зерна [1]. Приняв, что размеры электродов в рабочей электродной камере бесконечно велики по сравнению с межэлектродным расстоянием, в направлении которого происходит изменение температуры, можно рассматривать систему как одномерное поле между двумя неограниченными пластинами. Считая мощность внутренних источников теплоты постоянной, температурное поле в зерновой массе толщиной $2R$ можно представить уравнением [4]:

$$\theta_{(x,\tau)} = \frac{T_{(x,\tau)} - T_n}{T_c - T_n} = 1 + \frac{1}{2} Po \left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{2} \right) \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n Fo), \quad (1)$$

где $T_{(x,\tau)}$ – температура зерновой массы на расстоянии x от центра в момент времени τ , К; T_n – начальная температура зерновой массы, К; T_c – температура окружающей среды, К; Po – критерий Померанцева:

пература окружающей среды, К; Po – критерий Померанцева:

$$Po = \frac{\gamma E^2 R^2}{\lambda (T_c - T_n)}, \quad (2)$$

где γ – удельная проводимость зерновой массы, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$; E – напряженность электрического поля, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$; λ – теплопроводность зерновой массы, $\text{Вт} (\text{м}^2 \cdot \text{К})^{-1}$; Bi – критерий Био:

$$Bi = \frac{kR}{\lambda}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт} (\text{м}^2 \cdot \text{К})^{-1}$; A_n – начальная тепловая амплитуда:

$$A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (4)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения $\text{tg} \mu = \mu (Bi - 1)$, определяемые по таблицам; Fo – критерий Фурье:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}, \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$:

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}. \quad (6)$$

Для зерновой массы критерий $Bi > 1$, тогда корни характеристического уравнения $\mu_n = n\pi$, где $n = 1 \dots \infty$ [4].

Так как при поточной обработке время нахождения зерновой массы в плоскости перпендикулярной электродам в данной точке бесконечно мало, то критерий $Fo \rightarrow 0$. При таких значениях критериев Bi и Fo можно ограничиться первым членом ряда (1), соответствующим корню $\mu_1 = 1, A_1 = 2$. Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\theta = \frac{T_x - T_n}{T_c - T_n} = 1 + \frac{1}{2} Po \left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{Bi} - \left(1 + \frac{Po}{\pi^2} \right) \cdot \frac{2x}{R} \right) \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (7) в плоскости, перпендикулярной электродам, перепад температур между центром и поверхностью (в приэлектродной зоне) обрабатываемой массы близок к нулю, т.е. достигается высокая равномерность температурного поля в камере, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [1].

Графики температурного поля в зерновой массе между электродами (рис. 1) при обработке электрическим током и при подводе косвенной теплоты (через стенку при температуре пара 373К) существенно различаются. Приведенные кривые показывают распределение температуры по длине камеры в относительных единицах (L_1 - расстояние от рассматриваемой точки до левого электрода; L - межэлектродное расстояние) в течение времени от начала обработки соответственно: 1,6- 0с; 2- 52с; 3- 112с; 4- 160с; 5- 225с; 7- 27с; 8- 50с; 9- 67с; 10- 78с. Температурное поле в зерновой массе при нагреве косвенной теплотой резко неравномерное, особенно в начальный период. Высокий перепад температур приводит к более интенсивному нагреву массы вблизи источника теплоты и клейстеризации крахмала, снижая теплопроводность материала в этой зоне. Анализируя кривые 1...5 (рис. 1), можно сказать, что при нагреве корма от контактных поверхностей теплообмена имеет место высокая неравномерность температурного поля, осо-

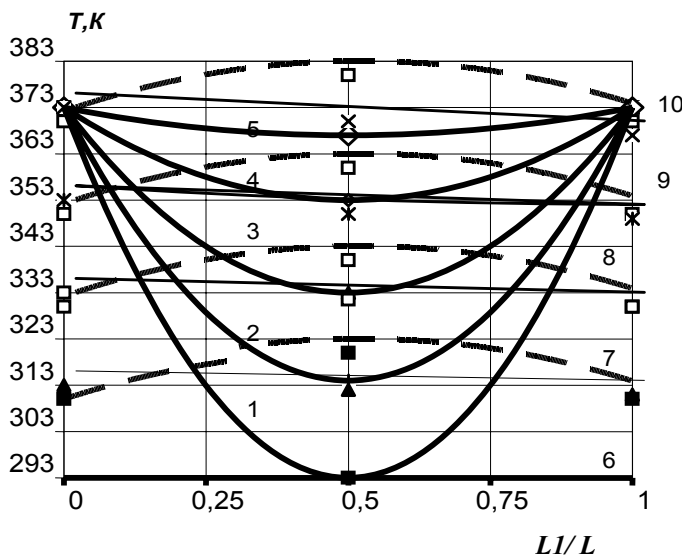


Рисунок 1. Температурное поле в зерновой массе при обработке косвенной теплотой (1...5) и в электрическом поле (6...10).

бенно на начальном этапе. Выравнивание температуры по объему камеры происходит за время, в 3 раза большее, чем при обработке электрическим полем.

Качественно другая картина температурного поля наблюдается в материале при обработке электрическим током. Благодаря объемному вводу энергии вся зерновая масса нагревается одинаково равномерно по всему объему камеры. Неравномерность температурного поля в камере при обработке электрическим током не превышает 5К. При этом отмечается более быстрое повышение температуры у фазного электрода. В этой области наблюдается некоторое пенообразование, здесь раньше развиваются явления, нарушающие нормальное протекание процесса, что, вероятно, связано с влиянием потенциала на приэлектродные и электрохимические процессы. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными, полученными по уравнению (7), не превышает 7...8%.

Уравнение теплового баланса в рабочей камере при плоскопараллельной электродной системе имеет вид:

$$mC \frac{d\theta}{d\tau} = \gamma U^2 \frac{h}{K} - kF(\theta - \theta_0), \quad (8)$$

где m, C, θ, γ — соответственно масса (кг), удельная теплоемкость (Дж/кг·К), температура (К) и удельная проводимость (См·м⁻¹) обрабатываемого материала; U - напряжение на электродах, В; $K = l/b$ - геометрический коэффициент электродной системы; b, h - соответственно ширина и высота электродов, м; l - межэлектродное расстояние (м); k - коэффициент теплопередачи от нагреваемого материала (зоны нагрева) к окружающей среде, Вт·(м²·К)⁻¹; F - площадь теплоотдающей поверхности, м²; θ_0 - температура окружающей среды, К.

Относительная сложность решения уравнения (8) заключается в том, что удельная теплоемкость, удельная проводимость и коэффициент теплопередачи зависят от температуры.

Научный интерес представляет получение математических моделей термического процесса при различных соотношениях тепловыделений и теплопотерь, а также с учетом термолабильности свойств обрабатываемого корма. В обобщенном контексте уравнение (8) можно представить следующим образом:

$$mC(\theta) \frac{d\theta}{d\tau} = \gamma(\theta) U^2 \frac{h}{K} - k(\theta) F(\theta - \theta_0), \quad (9)$$

где $C(\theta), \gamma(\theta), k(\theta)$ - соответственно температурные характеристики удельной теплоемкости, проводимости и коэффициента теплопередачи.

В инженерных расчетах обычно прибегают к некоторому упрощению зависимостей. Принимая во

внимание относительно небольшую длительность процесса обработки кормов электрическим током, а также низкую теплопроводность диэлектрического материала, из которого выполнены стенки рабочей камеры, можно полагать расчетные значения коэффициента теплопередачи и удельной теплоемкости постоянными, не зависящими от изменения температуры. Температурную характеристику проводимости кормового материала, подготовленного для обработки электрическим током, точно достаточной для инженерных расчетов, аппроксимируют линейным уравнением:

$$\gamma = \gamma_n (1 + \alpha \theta), \quad (10)$$

где γ_n - удельная проводимость материала при начальной температуре, См·м⁻¹; α - температурный коэффициент проводимости, 1/К.

С учетом указанных выше допущений уравнение (9) представим в виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} - \frac{1}{mC} \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K} - kF \right) \theta - \frac{kF}{mC} \left(\frac{\gamma_n U^2 h}{kFK} + \theta_0 \right) = 0. \quad (11)$$

Решение полученного дифференциального уравнения зависит от соотношения величины теплотеря и интенсивности изменения тепловыделения за счет температурного коэффициента проводимости обрабатываемого материала. Подробный анализ разнотипных задач рассмотрен в работе [3].

В условиях технологии электрогидротермической обработки зерна в установке периодического действия выполняется соотношение $kF < \frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K}$.

В таком случае общее решение уравнения (11) выражается следующей зависимостью:

$$\theta(\tau) = \theta_n \left\{ \exp \left[\frac{1}{mC} \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K} - kF \right) \tau \right] \right\} + \theta_y \left\{ 1 - \exp \left[\frac{1}{mC} \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K} - kF \right) \tau \right] \right\}, \quad (12)$$

где τ - время обработки; θ_y - установившаяся температура корма при $\tau \rightarrow \infty$.

Как следует из уравнения (12), температура обрабатываемого корма изменяется по экспоненте, стремясь к установившемуся значению, которое несложно определить из уравнения (11), приняв скорость нагрева равной нулю:

$$\theta_y = - \left(\frac{\gamma_n U^2 h}{kFK} + \theta_0 \right) / \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{kFK} - 1 \right). \quad (13)$$

Из полученного решения (12) находится выражение для определения времени нагрева материала до

температуры θ в промежутке от начальной θ_n до установившейся θ_y :

$$\tau = (\theta_0 - \theta_n) / \left[\frac{kF}{mC} \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K} + \theta_0 \right) \right]. \quad (14)$$

Выражение скорости нагрева как важной характеристики термического процесса может быть получено, если продифференцировать решение (12) по времени τ :

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\theta_n - \theta_y}{T} \exp \left(\frac{\tau}{T} \right), \quad (15)$$

где $T = mC / \left(\frac{\alpha \gamma_n U^2 h}{K} - kF \right)$ - постоянная времени нагрева.

На рис. 2 приведена зависимость средней скорости нагрева $d\theta/d\tau$ от напряженности электрического поля в температурном интервале 293...373К. Штриховой линией показана расчетная зависимость по уравнению (15). Расхождение между ними составляет не более 8% в начальной половине диапазона и не превышает 10% при предельном значении напря-

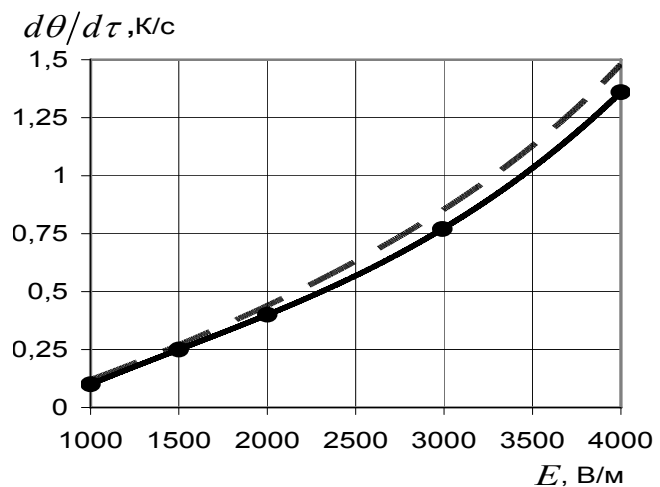


Рисунок 2. Зависимость скорости нагрева зерновой массы от напряженности электрического поля.

женности электрического поля.

Характер работы электрических нагревателей в проточных и непроточных аппаратах практически одинаков (различие состоит лишь в том, что в проточных установках электроды по длине неравномерно загружены по плотности тока), поэтому расчет их можно вести по единой методике с учетом этой особенности.

Выводы

При электродной обработке проводящих кормовых материалов электрический ток, даже если его рассматривать чисто как энергоноситель, создает положительный технологический эффект, выраженный в объемном вводе энергии, высокой интенсивности и равномерности нагрева.

Из-за определенной неоднородности электрических свойств компонентов дисперсной системы, электрический ток оказывает, помимо объемного нагрева, также и избирательное термическое действие, повышая температуру отдельных субстанций материала. Этими факторами, а также электрофизическим и электрохимическим действиями тока, можно объяснить снижение конечной температуры обработки, а также более значительный угнетающий или стимулирующий жизнедеятельность биологических объектов эффект в сопоставимых опытах при электрической обработке по сравнению с косвенным нагревом [1,2].

Полученные математические модели процесса нагрева корма справедливы в пределах принятых допущений, в которых можно считать температурную характеристику проводимости линейной, а удельную теплоемкость и коэффициент теплопередачи не зависящими от температуры. В диапазоне высоких температур более интенсивно происходят деструктивные преобразования органических веществ и изменяются формы связи влаги, что влечет за собой соответствующее изменение электрофизических свойств. При этом процесс может переходить в режим более быст-

рого возрастания или уменьшения скорости нагрева. Эти явления значительно усложняют приэлектродные процессы, обеспечение требуемых режимов обработки и управление.

Значит, термическое действие электрического тока на обрабатываемый материал носит комплексный характер, имеет свои специфические технологические особенности и проявления в дисперсных органических системах, представляет важное научное и практическое значение при обработке кормов и других биологических объектов. Полученные математические модели температурного поля, кинетики электрического нагрева термолабильных кормовых материалов найдут свое применение при анализе термических процессов, расчете и создании электротехнологических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корко, В.С. Разработка электрогидротермического способа обработки фуражного зерна: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Корко. – М.: ВИЭСХ, 1984. – 216 с.
2. Заяц, Е.М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов / Е.М. Заяц. – Мн.: Ураджай, 1997. – 216 с.
3. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М.А. Прищепов. – Мн.: БелНИИагроэнерго, 1999. – 295 с.
4. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.

УДК 621.315.592:772. В 99

ПОСТУПИЛА РЕДАКЦИЮ 30.01.2008

ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Е.В. Галушко, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ); В.Н. Ильин, докт. техн. наук (Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ)

Аннотация

Разработан новый принцип построения измерительных преобразователей, основанный на представлении измерительного диапазона дискретными моделями пространственного распределения интенсивности монохроматического излучения в виде дифракционных экстремумов. Разработана и реализована на ПЭВМ математическая модель, позволяющая моделировать и отображать дифракционные экстремумы с дискретностью 1 мкм.

Введение

При создании новых прецизионных приборов, включающих маломощные лазерные источники излучения и оптические схемы, основанные на принципах интерференции и дифракции света, на первый план выходит развитие методов нормирования аналоговых сигналов и обработки цифровых измерительных данных. Определяющей в этом случае является степень идентифи-

кации геометрических параметров объекта или его положения в измерительной зоне и оптического отклика, или параметров фотоэлектрического импульса.

В современных технологиях по-прежнему актуальна задача, связанная с определением положения технологического объекта в пространстве и величины его перемещения вдоль заданных координат. Из большого числа известных методов измерения [1, 2] наиболее широкое распространение получили опти-