

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОТОЧНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

М.А.ПРИЩЕПОВ, кандидат технических наук, БАТУ

Анализ основных низкотемпературных технологических процессов сельскохозяйственного производства [1] свидетельствует о том, что использование электродного нагрева возможно в технологических процессах, где допустим объемный ввод электрической энергии в обрабатываемую среду, что исключает существенные недостатки поверхностного нагрева, обусловленные низкой температуропроводностью обрабатываемых сред и ограничением допустимой температуры на контактной поверхности теплообмена. При этом в электродном нагреве наряду с температурой обрабатываемой среды ограничивается или задается распределение плотности тока в межэлектродном пространстве, которое зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления обрабатываемой среды, являющегося в свою очередь функцией температуры среды. Несоблюдение указанных ограничений приводит к необратимому ухудшению качества обрабатываемых сред и отложению осадка на электродах из-за клейстеризации крахмала, карамелизации сахара [2, 3] и т.д., что в конечном итоге нарушает нормальную работу электродной нагревательной установки (ЭЭУ).

Выполнение этих, на первый взгляд, достаточно простых требований влечет за собой необходимость исследования температурных зависимостей электрофизических характеристик обрабатываемых сред, выбора типа электродной системы с последующим расчетом ее параметров. Наличие выраженной зависимости удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры ее нагрева требует специальных конструктивных мер по обеспечению равномерности нагрева, а также снижению габаритных размеров проточных электродных нагревателей. Необходимость проведения этих мер объясняется тем, что напряженность электрического поля или плотность тока в межэлектродном пространстве достигает наибольших значений в определенных точках, как правило, на выходе нагревателя относительно направления потока обрабатываемой среды из-за снижения ее удельного сопротивления при повы-

шении температуры и не должна превышать допустимых значений для конкретной величины удельного сопротивления. Поэтому принятие в качестве расчетных значений для всех точек нагревателя этих значений напряженности электрического поля или плотности тока приводит к неравномерному нагреву обрабатываемой среды и увеличению габаритных размеров электронагревателя и тем более значительному, чем сильнее выражена зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры.

Форма электродной системы обуславливает картину электрического и температурного полей и, следовательно, равномерность нагрева сред по объему. Поскольку процессы обработки быстротечны и выравнивание температурного поля за счет конвекции практически исключено, для обработки кормовых материалов и вообще термолабильных сред могут использоваться только плоскопараллельные электродные системы, создающие одномерные и равномерные электрические поля [4]. Любые искажения электрического поля при обработке термолабильных сред, дополнительно усиленные температурной зависимостью их удельного сопротивления, т.е. ТКС, ведут к прогрессирующему изменению температурного поля и возникновению локальных перегревов.

Наибольший интерес при обработке термолабильных сред в потоке, а соответственно, и пояснений требуют способы выравнивания плотности тока в межэлектродном пространстве. Весьма доступной и эффективной мерой обеспечения этого условия, а также снижения габаритных размеров плоских электродных нагревателей является их секционирование и зонирование, т.е. параллельное, последовательное и смешанное соединение отдельных межэлектродных секций или зон (условно разделенных) обрабатываемой среды с целью получения по длине всего нагревателя предельно допустимых или заданных значений плотности тока или напряженности электрического поля, что обеспечивает высокую равномерность нагрева среды и минимальные габаритные

размеры электронагревателя (рис.1).

Отличие проточного ЭЭН с секционированной системой (рис.1 а) от проточного с плоскопараллельной системой заключается в изменении площади поперечного сечения межэлектродного канала по ходу обрабатываемой среды, проводимого в основном путем изменения межэлектродного расстояния h_3 и ширины электродов Π_3 , как по одному, так и вместе.

В данном случае процессы, происходящие в ЭЭН на элементарном участке в одномерном пространстве X вдоль канала протекания обрабатываемой среды во времени τ , описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$C_p \rho_c h_3 \Pi_3 \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U^2 \Pi_3 \eta}{\rho_t(\theta_c) h_3}, \quad (1)$$

где η - КПД ЭЭН;

$\rho_t(\theta_c)$ - удельное сопротивление термообрабатываемой среды при температуре θ_c , Ом.м.

При этом у ЭЭН межэлектродное расстояние и ширина электродов либо вместе, либо по одному, являются функцией текущей координаты длины электронагревателя, т.е. $h_3(x)$, $\Pi_3(x)$.

Необходимость использования более сложных

проточных ЭЭН с зонированной электродной системой (рис. 1 б, в) обусловлена обеспечением возможности нагрева сред с сильно выраженной зависимостью удельного сопротивления от температуры, например, таких как меласса, удельное сопротивление которой при нагреве от 20 до 60°C меняется в 10...15 раз [3], что при использовании ЭЭН с секционированной электродной системой потребует практически во столько же раз изменить поперечное сечение канала протекания среды в нагревателе на выходе относительно сечения входа. Однако это не всегда возможно конструктивно при условии обеспечения отсутствия застойных зон в нагревателе. Поэтому в данном случае наиболее целесообразно наряду с секционированием (параллельным соединением условно разделенных межэлектродных секций) проводить зонирование, т.е. последовательное соединение зон (назовем параллельное соединение смешанных секций зонами). При этом - вариант выполнения проточного ЭЭН с зонированной электродной системой, представленный на рис.1,в обладает меньшей материальностью в сравнении с аналогичным ЭЭН, представленным на рис. 1,б, но оказывает большее гидравлическое сопротивление потоку обрабатываемой среды.

Таким образом, получается смешанное соединение условно разделенных межэлектродных сек-

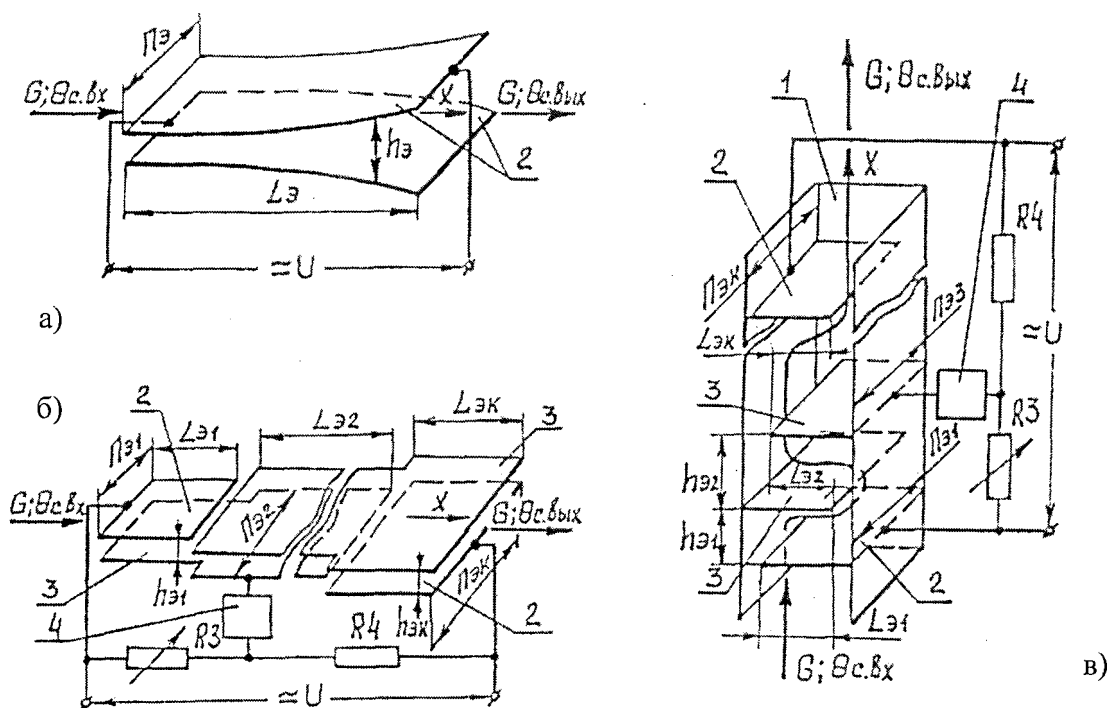


Рис. 1. Электродные проточные нагреватели с секционированной (а) и зонированными (б, в) электродными системами: 1 - корпус; 2 - основные токоподводящие электроды; 3 - дополнительные электроды; 4 - управляющий орган системы автоматического регулирования; R3, R4 - термонезависимые сопротивления измерительного моста.

ций, которое технически выполняется сложнее, но обеспечивает возможность создания заданного распределения плотности тока в обрабатываемой среде при меньшем изменении поперечного сечения межэлектродного пространства, либо вовсе при постоянном, что важно при нагреве вязких обрабатываемых сред. В данном случае электронагреватель имеет количество электродов больше двух, обеспечивающее соединение его нескольких зон последовательно и включение их на полное напряжение питающей сети. Тогда для описания электротепловых процессов, происходящих в нем в одномерном пространстве и во времени, уравнение (1) запишется для конкретной k-ой зоны и, кроме того, записываются уравнения, описывающие мгновенное значение тока электронагревателя и электрическую связь между последовательно соединенными зонами:

$$C_p \rho_c h_3 \pi_3 \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U k^2 \pi_3 \eta}{\rho_t(\theta_c) h_3}; \quad (2)$$

$$U k = \sum_{k=1}^K I \cdot R_k; \quad (3)$$

$$I = U/R; \quad (4)$$

$$R = \sum_{k=1}^K R_k; \quad (5)$$

$$R k = \int_0^{L_{3k}} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_{3k}} h_3 dx / \left(\int_0^{L_{3k}} \pi_3 dx \cdot L_{3k}^2 \right), \quad (6)$$

где I - мгновенное значение полного тока электронагревателя, А;

U_k - напряжение на k-ой последовательно соединенной зоне, В;

R_k - мгновенное значение сопротивления k-ой последовательной зоны, Ом;

L_{3k} - длина k-ой зоны электронагревателя;

R - мгновенное значение полного сопротивления электронагревателя, Ом;

K - количество последовательно соединенных зон электронагревателя.

При разработке математических моделей (ММ) приведенных выше электротепловых схем ЭЭН были приняты следующие допущения:

плотность и удельная теплоемкость обрабатываемой среды для всех ЭЭН не зависят от температуры;

температура среды и выделяемая удельная мощность в любом поперечном сечении канала ЭЭН принята средней;

теплота гидравлических потерь и теплообмен в направлении движения обрабатываемой среды в самой среде для ЭЭН пренебрежимо мала;

теплоемкость корпусов и электродных систем ЭЭН малы;

потери теплоты на парообразование обрабатываемой среды также незначительны;

потери энергии на протекающие электрические реакции (электролиз) в межэлектродном пространстве ЭЭН незначительны.

Решение обеих ММ, характеризующих рассмотренные выше электротепловые схемы ЭЭН, находим в виде $\theta_c(x, \tau)$ при заданных исходных данных и заданных краевых условиях. При определении краевых условий исходят из реальных условий теплообмена на границах нагревателя в любой момент времени нагрева (граничные условия) и начальной температуры по всей длине его межэлектродного пространства в начальный момент (начальные условия).

Для всех вариантов ЭЭН теплообменом на их границах можно пренебречь, так как теплообмен теплопроводностью здесь незначителен в сравнении с тепломассопереносом, тогда:

$$\text{при } x = 0 \quad \theta_c = \theta_{cx=0}; (d\theta_c/dx)_{x=0} = 0;$$

$$\text{при } x = L \quad \theta_c = \theta_{cx=L}; (d\theta_c/dx)_{x=L} = 0.$$

Начальным условием для процесса разогрева всех ЭЭН будут условия равенства температуры обрабатываемой среды по всей длине нагревателя температуре на его входе, т.е.

$$\text{при } \tau = 0 \quad \theta_c = \theta_{c(0) \tau=0}.$$

Очевидно, что приведенные ММ содержат уравнения в частных производных, которые к тому же являются нелинейными и не имеют точных аналитических решений. В связи с этим для расчета таких задач используются численные методы, с помощью которых можно получить таблицу приближенных значений исходного решения.

Для решения этих уравнений введем конечно-разностную сетку [5, 6] с координатами узлов (x_l, t^n) ,

$$\text{где } x_l = lh, l = 1, 2, 3, \dots, k, t^n = \sum_{n=1}^N \tau_n$$

и согласно [5] построим разностную схему следующего вида для уравнения (1) (для уравнения (2) она будет аналогична, но параметр U будет с индексами - U_k^n):

$$C_p \rho_c h_{3l} \pi_{3l} \cdot \frac{\theta_{cl}^{n+1} - \theta_{cl}^n}{\tau} + C_p G \sigma \cdot \frac{\theta_{cl+1}^{n+1} - \theta_{cl-1}^{n+1}}{2 \cdot h} + C_p G \cdot (1 - \sigma) \cdot \frac{\theta_{cl+1}^n - \theta_{cl-1}^n}{2 \cdot h} = \frac{U^2 \pi_{3l} \eta}{\rho_t(\theta_c^n) h_{3l}}.$$

Фиксируя значение параметра σ , получаем

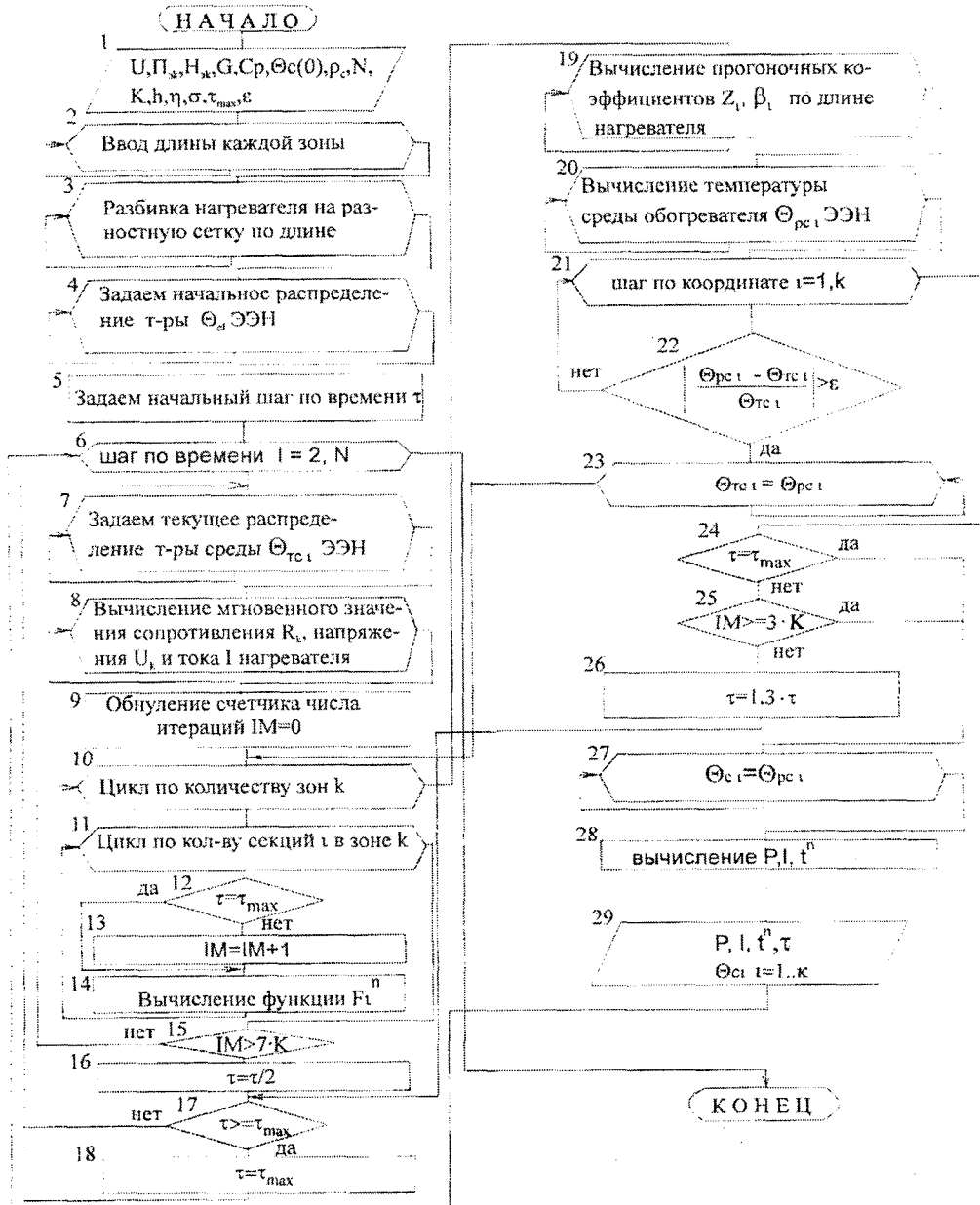


Рис. 2. Алгоритм расчета электротепловых характеристик секционированных и зонированных ЭЭН.

разностные схемы с различными свойствами. В частности, при $\sigma=0$ имеем явную разностную схему, при $\sigma=1$ - схему с опережением, а при $\sigma=0,5$ - симметричную. Все разностные алгоритмы, полученные при $\sigma \neq 0$, не явные и являются абсолютно устойчивыми при любых соотношениях между шагами сетки по времени и пространству. Для определения значений θ_{cl}^{n+1} они требуют решения системы алгебраических уравнений:

$$\theta_{cl-1}^{n+1} - \frac{2\rho_c h_{э1} \pi_{э1} h}{G \cdot \sigma \cdot \tau} \cdot \theta_{cl}^{n+1} - \theta_{cl+1}^{n+1} = -F_l^n,$$

$$F_l^n = \frac{\sigma-1}{\sigma} \cdot (\theta_{cl+1}^n - \theta_{cl-1}^n) + \frac{2\rho_c h_{э1} \pi_{э1} h}{G \cdot \sigma \cdot \tau} \cdot \theta_{cl}^n + \frac{2U^2 \pi_{э1} \eta}{\rho_c (\theta_c^n) h_{э1} C_p G \sigma}$$

Полученная система алгебраических уравнений имеет трехдиагональную матрицу, поэтому наиболее рациональный способ решения системы такого вида - метод прогонки, который заключается в следующем.

Из граничных условий находят прогоночные коэффициенты α и β на концах нагревателя, т.е. в

начале и в конце. Для этого граничные условия при $x=0$ преобразуем к виду:

$$\theta_{c1} = \alpha_1 \cdot \theta_{c2} + \beta_1,$$

а при $x = L$ - к виду

$$\theta_{ck} = \alpha_k \cdot \theta_{ck-1} + \beta_k.$$

Записав разностные схемы для каждого из граничных условий и преобразовав их к соответствующему виду, получим прогоночные коэффициенты:

$$\text{при } x = 0 \quad \theta_{c1} = \theta_{c2}; \alpha_1 = 1; \beta_1 = 0;$$

$$\text{при } x = L \quad \theta_{ck} = \theta_{ck-1}; \alpha_k = 1; \beta_k = 0.$$

Вычислив прогоночные коэффициенты α и β на концах электронагревателя, определим их значения в оставшихся точках 2, 3, 4, ..., k-1, по следующим рекуррентным формулам:

$$\alpha_1 = 1 / (\alpha_{1-1} - 2\rho_c \cdot h_{з1} \cdot p_{з1} \cdot h / (G \cdot \sigma \cdot \tau));$$

$$\beta_1 = -\alpha_1 \cdot (\beta_{1-1} + F_1^n).$$

После расчета прогоночных коэффициентов находят значение температуры обрабатываемой среды на выходе из электронагревателя, т.е. в точке К:

$$\theta_{ck}^{n+1} = (\alpha_k \cdot \beta_{k-1} + \beta_k) / (1 - \alpha_k \cdot \alpha_{k-1}).$$

Далее определяют значение температуры обрабатываемой среды в оставшихся точках k-1, k-2, k-3, ..., 1 по рекуррентной формуле:

$$\theta_{cl}^{n+1} = \alpha_1 \cdot \theta_{cl+1}^{n+1} + \beta_1$$

Поскольку решаемое уравнение нелинейное, то на каждом шаге по времени его необходимо решать методом приближений, т.е. на каждом шаге по времени строится итерационный процесс и производится уточнение параметров (в нашем случае параметров $\rho_1(\theta_c), R_k, R, I, U_k$), зависящих от решения (температуры среды θ_{cl}^{n+1}). Уточнение указанных параметров будет проводиться в той последовательности, как они записаны в скобках, соответственно, по формулам (3) ... (6). В итерационных процессах целесообразно контролировать их устойчивость по числу итераций, необходимых для получения требуемой точности вычислений.

Соблюдение данного условия приводит к ведению вычислительного процесса с переменным шагом по времени, при этом достигается высокая адекватность математической модели с реальным физическим процессом.

На рис. 2 представлен укрупненный алгоритм расчета электротепловых характеристик секционированных и зонированных ЭЭН. В приведенной блок-схеме приняты следующие обозначения:

τ_{\max} - максимально допустимый шаг по времени, определяемый, исходя из условия устойчивости вычислительного процесса, с;

ε - максимально допустимая относительная погрешность вычислений;

P - мгновенное значение мощности электронагревателя, Вт.

При расчете характеристик проточных ЭЭН с секционированными электродными системами выполняются практически все блоки приведенного алгоритма (за исключением блока 8) и в той же последовательности, однако процесс вычисления многих параметров, ввода исходных данных и разбивки нагревателя на разностную сетку по длине организуется проще, что в некоторой степени упрощает его

В заключение необходимо отметить, что несмотря на достаточно сложный расчет электротепловых характеристик секционированных и зонированных ЭЭН их использование позволяет значительно расширить область применения и повысить эффективность электродного нагрева.

Литература

1. Герасимович Л. С., Прищепов М.А. Саморегулируемые поверхностно-распределенные электронагреватели и эффективность их использования. Обзорная информация. — Мн.: БелНИИНТИ, 1989.—60 с.
2. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А., Цыбульский П.П. Исследование электродного нагрева для тепловой обработки кормового картофеля // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства . — 1975 — № 8. — с. 28-30.
3. Заяц Е.М. Разработка и исследование электродного нагрева мелассы в процессах производства комбикормов. Дис. канд. техн. наук.: 05.20.02. — Минск, 1977.— 256 с.
4. Карасенко В.А. Электрификация тепловых процессов в животноводстве .—Минск: Ураджай, 1976.—160с.
5. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена .— Минск: Наука і тэхніка ,1976.— 114с.
6. Герасимович Л.С., Прищепов М.А., Рутковский И.Г. Математическое моделирование динамических характеристик секционированных проточных электродных электронагревателей // Проблемы развития энергетики и электрификации АПК : Сб. научн. тр. /БелНИИАгроЭнерго .— Мн., 1994.— с.17-25.