

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

И.Г. Рутковский,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

В статье приведены математические модели для исследования статических и динамических характеристик проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродной системой. Получены аналитические зависимости, описывающие распределение температуры, сопротивления, мощности и плотности тока по длине проточных однозонных электродных электронагревателей с плоскопараллельной электродной системой в статическом режиме работы.

Ключевые слова: проточный электродный электронагреватель, статическая характеристика, динамическая характеристика, плоскопараллельная электродная система, секционированная электродная система, зонированная электродная система.

The article presents mathematical models for the study of static and dynamic characteristics of flow-through electrode electric heaters with a plane-parallel, partitioned and zoned electrode system. Analytical dependences describing the distribution of temperature, resistance, power and current density along the length of flowing single-band electrode electric heaters with a plane-parallel electrode system in static operation were obtained.

Key words: flow-through electrode electric heater, static characteristic, dynamic characteristic, plane-parallel electrode system, partitioned electrode system, zoned electrode system.

Введение

Потребление электрической энергии для тепловых нужд постоянно возрастает. Это отмечают в своих научно-исследовательских работах Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А., Герасимович Л.С. и многие другие ученые [1-3]. При этом в публикациях Кувалдина А.Б., Шишиной Н.Г., Птицыной Е.В. указывается, что электронагревательные установки (ЭНУ) с электродными электронагревателями (ЭЭН) менее взрыво- и пожароопасны и требуют значительно меньших затрат на обслуживание, имеют высокий КПД, незаменимы там, где требуется высокая культура производства, точность поддержания температуры и быстрдействие [4-6].

Проточные ЭЭН могут быть реализованы в виде различных электротепловых схем [2; 4; 5; 7]. Расчет электротепловых процессов (в пространстве и во времени) для этих электротепловых схем требует численного решения соответствующих систем дифференциально-интегральных уравнений с использованием ЭВМ. Вместе с тем для предварительного расчета и анализа работы проточных ЭЭН целесообразно иметь хотя бы статические электротепловые характеристики в аналитическом виде.

Цель данной статьи – разработать математические модели и исследовать статические и динамические характеристики проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродной системой.

Электротепловых процессов (в пространстве и во времени) для этих электротепловых схем требуют численного решения соответствующих систем дифференциально-интегральных уравнений с использованием ЭВМ.

Основная часть

В настоящее время разработаны разнообразные варианты ЭНУ с ЭЭН. Для исследования электротепловых процессов в ЭЭН с плоскими электродными системами достаточно математических моделей ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, ЭЭН с секционированной и ЭЭН-Д с зонированной электродной системой (рис. 1), которые можно адаптировать к конкретным электротепловым схемам ЭЭН.

Электротепловые процессы, происходящие в проточном однозонном ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, в ЭЭН с секционированной и ЭЭН-Д с зонированной электродной системой (рис. 1), вдоль канала протекания среды во времени, описываются следующим дифференциальным уравнением [7]:

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

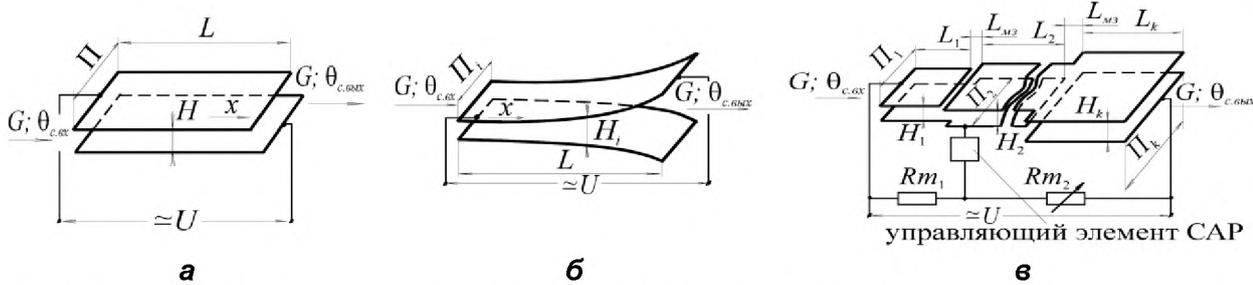


Рисунок 1. Типовые электротепловые схемы проточных ЭЭН: с плоскопараллельной электродной системой (а); с секционированной (б) и зонированной (в) электродной системой (ЭЭН-Д): САР – система автоматического регулирования; L – длина электродов ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой и секционированного ЭЭН (L_1, L_2, L_N – ЭЭН-Д), м; N – количество последовательно соединенных зон (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН-Д); H – межэлектродное расстояние ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (H_i – секционированного ЭЭН; H_1, H_2, H_N – ЭЭН-Д), м; Π – ширина электродов ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой ЭЭН (Π_i – секционированного ЭЭН; Π_1, Π_2, Π_N – ЭЭН-Д), м; $\theta_{c,вх}, \theta_{c,вых}$ – температура на входе и на выходе ЭЭН, ЭЭН-Д, °С; Rm_1, Rm_2 – термнезависимые сопротивления измерительного моста ЭЭН-Д, Ом; G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с; U – напряжение питания, В

где C_p – удельная теплоемкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·°С);

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

$H(x)$ – межэлектродное расстояние на расстоянии x от начала ЭЭН, ЭЭН-Д ($H(x)=H$ – при расчете электротепловых процессов в ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой), м;

x – текущая длина от начала ЭЭН, ЭЭН-Д, м;

$\Pi(x)$ – ширина электродов на расстоянии x от начала ЭЭН, ЭЭН-Д ($\Pi(x)=\Pi$ – при расчете электротепловых процессов в ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой), м;

θ_c – температура обрабатываемой среды, °С;

G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;

U_i – напряжение питания на i -й секции (зоне) электронагревателя ($U(x)=U$ – при расчете электротепловых процессов в ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой и секционированном ЭЭН), В;

η – коэффициент полезного действия, о.е.;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м.

При описании электротепловых процессов в проточном ЭЭН-Д с зонированной электродной системой (рис. 1в) к уравнению (1), записанному для i -го участка (секции) любой k -й зоны, необходимо дополнить систему уравнений для вычисления напряжения U_k на k -й зоне ЭЭН [7]:

$$\left\{ \begin{aligned} U_k &= \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \\ I &= U / R; \quad R = \sum_{k=1}^N R_k; \\ R_k &= \frac{\int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H_k dx}{\int_0^{L_k} \Pi_k dx \cdot L_k^2}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где U_k – напряжение на k -й зоне ЭЭН-Д, В;

I – текущее значение полного тока ЭЭН-Д, А;

R_k – сопротивление k -й зоны ЭЭН-Д, Ом;

R – полное сопротивление ЭЭН-Д, Ом;

H_k, Π_k – межэлектродное расстояние и ширина электродов зон ЭЭН-Д, м;

L_k – длина электродов k -й зоны ЭЭН-Д, м.

Расчет величины информационного сигнала (ИС) в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д ΔU (рис. 1в) проводится по выражению [2; 8]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \times \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R} \quad (3)$$

где R_{pr} – внутреннее сопротивление измерительного прибора, Ом;

Rm_3, Rm_4 – термозависимые сопротивления ЭЭН-Д, образующие мостовую измерительную схему, Ом;

$Rm_{12} = Rm_1 + Rm_2$ – сумма термнезависимых сопротивлений мостовой измерительной схемы, Ом.

Решение дифференциального уравнения (1) в частных производных проводилось численно [7; 9-11]. Для решения уравнения (1), $H(x)$, $\Pi(x)$ и $U(x)$ необходимо задавать на дискретных участках, т.е. при $H(x)=H_i$, $\Pi(x)=\Pi_i$ и $U(x)=U_i$, а затем использовать следующую конечно-разностную схему аппроксимации дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} & C_p \cdot \rho_c \cdot H_i \cdot \Pi_i \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{\tau_i} + \\ & + C_p \cdot G \cdot \sigma \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - \theta_{i-1}^{n+1}}{2 \cdot h} + \\ & + C_p \cdot G \cdot (1 - \sigma) \frac{\theta_{i+1}^n - \theta_{i-1}^n}{2 \cdot h} = \end{aligned}$$

$$= \frac{U^2 \cdot \Pi_l \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_l}, \quad (4)$$

где θ_l^{n+1} – температура обрабатываемой среды на l -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

θ_l^n – температура обрабатываемой среды на l -й секции, n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

θ_{l+1}^{n+1} – температура обрабатываемой среды на $l+1$ -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

θ_{l-1}^{n+1} – температура обрабатываемой среды на $l-1$ -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

θ_{l+1}^n – температура обрабатываемой среды на $l+1$ -й секции, n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

θ_{l-1}^n – температура обрабатываемой среды на $l-1$ -й секции, n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

σ – вещественный параметр, определяющий удельный «вес» предыдущего и текущего шага при расчете;

h – величина шага по направлению x , м;

τ_i – величина шага по времени x , с.

Для решения алгебраической системы уравнений преобразуем конечно-разностную схему (3) к виду, обеспечивающему построение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\theta_{l-1}^{n+1} - \frac{2 \cdot \rho_c \cdot H_l \cdot \Pi_l \cdot h}{G \cdot \sigma \cdot \tau_i} \theta_l^{n+1} - \theta_{l+1}^{n+1} = -F_l^n, \quad (5)$$

где

$$F_l^n = \frac{\sigma - 1}{\sigma} (\theta_{l+1}^n - \theta_{l-1}^n) + \frac{2 \cdot \rho_c \cdot H_l \cdot \Pi_l \cdot h}{G \cdot \sigma \cdot \tau_i} \theta_l^n + \frac{2 \cdot U_l^2 \cdot \Pi_l \cdot h \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_l \cdot C_p \cdot G \cdot \sigma}. \quad (6)$$

При этом производная по x аппроксимировалась в виде полусуммы конечно-разностных соотношений на n -м и $(n+1)$ -м временных слоях. Поскольку уравнение нелинейное, то на каждом шаге по времени его необходимо решать методом приближений (итераций). На каждом шаге по времени строится итерационный процесс и производится уточнение параметров ($\rho_t(\theta_c)$, R , I , θ_c) в зависимости от температуры среды θ_l^{n+1} . Устойчивость итерационного процесса контроли-

ровалась по числу итераций, необходимых для получения требуемой точности расчета температуры. Если число итераций на расчетном временном слое превышает заданное максимальное их число ($N_{\max} \approx 7 \dots 10$), то временной шаг уменьшается в два раза, и расчет повторяется для этого временного слоя с уменьшенным шагом. Если же необходимая точность вычислительно-го процесса достигается за число итераций, меньшее минимального числа ($N_{\min} \approx 2 \dots 3$), то этот временной слой рассчитывается с шагом, в 1,3 раза большим предыдущего. В том случае, если число итераций IM находится в пределах $N_{\min} \leq IM \leq N_{\max}$, то очередной ($n+1$ -й) слой рассчитывается с шагом n -го слоя. Соблюдение данного условия приводит к ведению вычислительного процесса с переменным шагом по времени. При этом достигается высокая адекватность математической модели расчета статических и динамических характеристик и реального процесса нагрева.

Расчет статических и динамических электротепловых характеристики ЭЭН, ЭЭН-Д при нагреве обрабатываемой среды проводится по блок-схеме алгоритма (рис. 2). В приведенной блок-схеме алгоритма приняты следующие обозначения:

P – мгновенное значение мощности электронагревателя, Вт;

τ^n – текущее время расчета, с;

Ts – время расчета, с;

θ_{ci}^n – температура обрабатываемой среды на l -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

θ_{pci}^n – температура обрабатываемой среды на l -й секции, n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

N_l – количество секций ЭЭН-Д;

i – переменная цикла шага по времени.

Разработанные математические модели позволяют проводить расчет электротепловых характеристик, включая и величину ИС ЭЭН-Д, с погрешностью, не превышающей 4,3-8,3% относительно экспериментальных данных. Кроме того, результаты экспериментальной проверки адекватности разработанных математических моделей показали, что при разработке конструкции ЭНУ с ЭЭН-Д необходимо учитывать взаимное влияние соседних зон нагрева друг на друга. Это взаимное влияние выражается в протекании токов через обрабатываемую среду между зонами нагрева L_{M3} (рис. 1в). Увеличение расстояния между этими зонами L_{M3} (рис. 1в) до величины, не менее 4-х межэлектродных расстояний H_k , приводит к снижению величины этих токов и сопровождается повышением равномерности нагрева обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, что важно учитывать при проектировании ЭНУ. Быстротечность процессов нагрева в ЭЭН, ЭЭН-Д вызывает необходимость использования сложных схем регулирования температуры обрабатываемой среды (ПД, ПИД регуляторов, систем регулирования на основе микроконтроллеров или ЭЭН-Д). Повышение эффективности работы ЭНУ на базе многозонных ЭЭН-Д достигается за счет наличия в них внутренних обратных связей, обеспечивающих перераспределение мощности и контроль температурного поля при нагреве обрабатываемой среды.

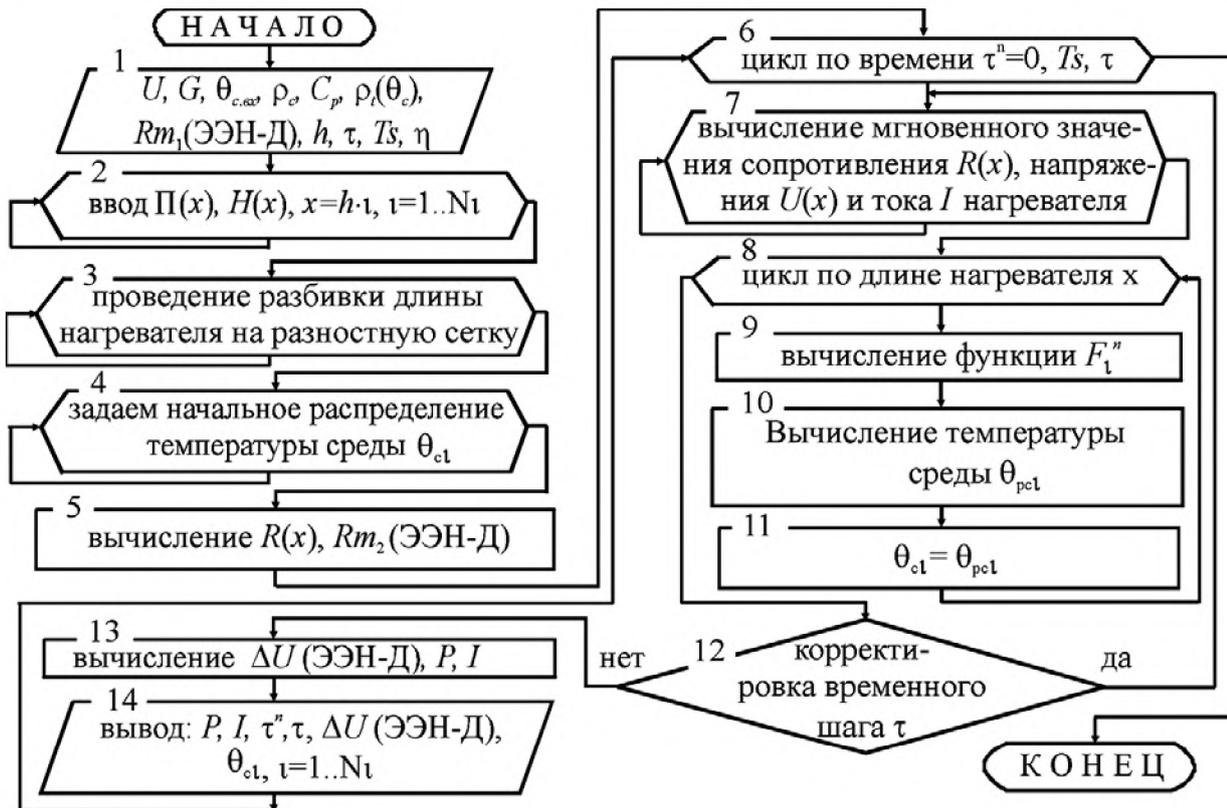


Рисунок 2. Алгоритм расчета статических и динамических характеристик основных электротепловых схем проточных ЭЭН, ЭЭН-Д

Разработанная математическая модель основных электротепловых схем проточных ЭЭН описывает происходящие в них электротепловые процессы и позволяет рассчитывать статические и динамические электротепловые характеристики ЭЭН. Однако для расчета конструктивных параметров ЭЭН не всегда возникает необходимость использования динамических характеристик. Как правило, достаточно иметь статические электротепловые характеристики в аналитическом виде.

Для ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой при $\partial\theta_c/\partial\tau=0$, $H(x)=H=\text{const}$, $\Pi(x)=\Pi=\text{const}$, $U(x)=U=\text{const}$ и $\rho_s(\theta_c) = 1/(\gamma_0 \cdot (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c))$,

где γ_0 – удельная электрическая проводимость обрабатываемой среды, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$;

α_{Π} – температурный коэффициент проводимости обрабатываемой среды, $1/^\circ\text{C}$ уравнение (1) примет вид:

$$C_p \cdot G \frac{d\theta_c}{dx} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c)}{H}. \quad (7)$$

Далее выражение (7) представим в виде:

$$\frac{d\theta_c}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (8)$$

После разделения переменных выражение (8) проинтегрируем:

$$\int_{\theta_c(0)}^{\theta_c(x)} \frac{d\theta_c}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (9)$$

Введем обозначение $y_c = 1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c$ и из него выразим $\theta_c = (y_c - 1) / \alpha_{\Pi}$.

С учетом проведенных преобразований выражение (9) примет вид:

$$\int_{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c0}}^{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} \frac{d\left(\frac{y_c - 1}{\alpha_{\Pi}}\right)}{y_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (10)$$

Преобразуем выражение (10) к виду:

$$\frac{1}{\alpha_{\Pi}} \int_{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c0}}^{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} \frac{dy_c}{y_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение (11) и получим:

$$\ln(y) \Big|_{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c0}}^{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} = \alpha_{\Pi} \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} x. \quad (12)$$

После преобразований выражение (12) примет вид:

$$\ln \left(\frac{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}} \right) = \alpha_{\Pi} \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} x. \quad (13)$$

Запишем выражение (13) в экспоненциальном виде:

$$\frac{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}} = e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} \alpha_{\Pi} \cdot x}. \quad (14)$$

Из выражения (14) получим распределение температуры обрабатываемой среды по длине ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой:

$$\theta_c(x) = \frac{\left((1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}) e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} \alpha_{\Pi} \cdot x} \right) - 1}{\alpha_{\Pi}} \quad (15)$$

При электродном нагреве ограничивается допустимая плотность тока $J(x)$ в обрабатываемой среде межэлектродного пространства. Для определения режимов работы ЭЭН необходимо также знать распределение мощности $W(x)$ и сопротивления $R(x)$ по длине x нагревателя.

Сопротивление $R_{\Delta xi}$ участков Δx_i обрабатываемой среды ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой при линейной зависимости $\rho_r(\theta_c)$ вычисляется по формуле:

$$R_{\Delta xi} = \frac{\rho_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c.sp.xi}) H}{\Pi \cdot \Delta x_i}, \quad (16)$$

где Δx_i – длина i -го участка ЭЭН, м;

$\theta_{c.sp.xi}$ – средняя температура обрабатываемой среды i -го участка, °С.

Распределение сопротивления $R(x)$ по длине секционированного ЭЭН:

$$R(x) = \frac{\rho_t (\theta_{c.sp.xi}) H_{xi}}{\Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}, \quad (17)$$

где H_{xi} , Π_{xi} – межэлектродное расстояние и ширина электродов, соответственно, на длине x от начала ЭЭН, м.

Аналогично, распределение сопротивления $R_k(x_k)$ по длине одной из зон многозонного ЭЭН-Д:

$$R_k(x_k) = \frac{\rho_t (\theta_{c.sp.xi.k}) H_k}{\Pi_k \cdot \Delta x_{ki}}, \quad (18)$$

где x_k – текущая длина зоны ЭЭН-Д от ее начала, м.

$\theta_{c.sp.xi.k}$ – средняя температура обрабатываемой среды i -го участка зоны, °С.

Мощность нагрева участков Δx_i ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой при линейной зависимости $\rho_r(\theta_c)$ определяется по формуле:

$$W_{\Delta xi} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \Delta x_i}{\rho_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c.sp.xi}) H}. \quad (19)$$

Распределение мощности нагрева по длине секционированного ЭЭН:

$$W(x) = \frac{U^2 \cdot \Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}{\rho_t (\theta_{c.sp.xi}) H_{xi}}. \quad (20)$$

Распределение мощности нагрева по длине одной из k -х зон многозонного ЭЭН-Д:

$$W_k(x_k) = \frac{U_k^2 \cdot \Pi_k \cdot \Delta x_{ki}}{\rho_t (\theta_{c.sp.xi.k}) H_k}. \quad (21)$$

Аналитически также можно провести расчет изменения плотности тока по длине ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой по формуле:

$$J(x) = \frac{U}{R_{\Delta xi} \cdot \Pi \cdot \Delta x_i}. \quad (22)$$

Сопротивление участка Δx_i обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве при линейной зависимости проводимости от температуры вычисляется по формуле:

$$R_{\Delta xi} = \frac{H}{\gamma_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)) \Pi \cdot \Delta x_i}. \quad (23)$$

Тогда формула (22) с учетом выражения (23), преобразуется к следующему виду:

$$J(x) = \frac{\gamma_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)) U}{H}. \quad (24)$$

С учетом выражения (15), после математических преобразований формула расчета изменения плотности тока по длине ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой примет вид:

$$J(x) = \frac{(1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}) U \cdot \gamma_0}{H} \times e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \alpha_{\Pi} \cdot \gamma_0 \cdot \eta}{H \cdot C_p \cdot G} x}. \quad (25)$$

Анализ полученных зависимостей позволяет отметить, что изменение температуры и плотности тока в обрабатываемой среде по длине ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой описывается экспоненциальным законом, зависит от конструктивных параметров ЭЭН и электро-теплофизических характеристик обрабатываемой среды.

Закключение

1. Разработана математическая модель и алгоритм теоретического исследования основных электротепловых схем ЭЭН, ЭЭН-Д, которые могут быть применены для создания ЭНУ с заданным распределением плотности тока в среде межэлектродного пространства на базе секционированных и зонированных

ЭЭН, ЭЭН-Д, а также их эффективного использования. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в ЭЭН, ЭЭН-Д показывают, что их динамические характеристики имеют экспоненциальный вид, на который существенное влияние оказывают коэффициенты сопротивления (проводимости) обрабатываемой среды, а также секционирование и зонирование электродных систем ЭЭН, ЭЭН-Д.

2. Полученные аналитические статические характеристики проточных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, описывающие распределение температуры $\theta(x)$, сопротивления $R(x)$, мощности $W(x)$ и плотности тока $J(x)$ по длине ЭЭН, также имеют экспоненциальные зависимости, определяемые их конструктивными параметрами и теплофизическими характеристиками обрабатываемой среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – Минск: Колос, 1975. – 384 с.
2. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства. – Минск: БАТУ, 1999. – 295 с.
3. Герасимович, Л.С. Разработка научно-технических основ низкотемпературного поверхностно-распределенного электронагрева в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Л.С. Герасимович. – Челябинск, 1982. – 45 с.
4. Шишинина, Н.Г. Сравнительная характеристика электродных водонагревателей для сельскохозяйственного производства / В.А. Глухарев, Н.Г. Шишинина // Вестник Саратовского гос. аграрного университета им Н.И. Вавилова. – 2007. – № 2. – С. 48-50.
5. Птицына, Е.В. Низковольтные электродные водоподогреватели с питанием током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158) С. 20-27.
6. Прищепов, М.А. К вопросу анализа чувствительности зонированных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин: тезисы второй республиканской науч.-техн. конференции, 21-23 мая 1996 г. – Минск: БАТУ, 1996. – С. 22.
7. Герасимович, Л.С. Математическое моделирование динамических характеристик секционированных проточных электродных электронагревателей / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Проблемы развития энергетики и электрификации АПК: сборник науч. тр. / БелНИИагроэнерго. – Минск, 1994. – С. 17-25.
8. Прищепов, М.А. Оптимизация информационной чувствительности емкостных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский, Wojciech Tanas // Aktualne problemy inzynierii rolniczej w aspekcie integracji Polski z unia Europejska: Jubileuszowa miedzynarodowa konferencja naukowa, XXX lat Wydzialu Techniki Rolniczej AR w Lublinie, Lublin, 13-14 wrzesnia 2000 r. – Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, 2000. – S. 151-153.
9. Годунов, С.К. Разностные схемы (введение в теорию) / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М., 1977. – 440 с.
10. Берковский, Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. – Минск: Навука і тэхніка, 1976. – 144 с.
11. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М.: Наука. (гл. ред. физ.-мат. лит.), 2002. – 300 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 11.12.2023

Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/55 предназначен для гладкой вспашки старопашотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

Производство плугов освоено на ДП «Минийтовский ремонтный завод».

В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.

Основные технические данные

| | |
|--|---------------------|
| Тип..... | навесной |
| Тип корпуса..... | полувинтовой |
| Производительность за 1 ч сменного времени, га..... | 0,65...1,14 |
| Конструкционная ширина захвата корпуса, мм..... | 400/450/500/550 |
| Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч..... | 7...9 |
| Масса плуга конструкционная, кг..... | не более 1150 |
| Конструкционная ширина захвата плуга, м..... | 1,20/1,35/1,50/1,65 |