

Научная статья
УДК 621.365.683.9

РАСЧЕТ НЕПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ С МНОГОЗОННОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ

Михаил Александрович Прищепов¹, Иосиф Геннадьевич Рутковский²

^{1,2}Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье приведена разработанная методика расчета непроточных электродных электронагревателей-датчиков с плоскопараллельной многозонной электродной системой. Отмечено, что сложность процессов, происходящих в электронагревательных установках с такими электродными электронагревателями требует использования численных методов расчета.

Ключевые слова: электронагрев, многозонный электродный электронагреватель-датчик, информационный сигнал, температура, моделирование, численный метод.

Original article

CALCULATION OF NON-FLOWING ELECTRODE ELECTRIC HEATERS-SENSORS WITH A MULTI-ZONE PLANE-PARALLEL ELECTRODE SYSTEM

Mikhail Alexandrovich Prishchepov¹, Iosif Gennadievich Rutkouski²

^{1,2}Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article presents the developed method for calculating non-flowing electrode electric heaters-sensors with a plane-parallel multi-zone electrode system. It is noted that the complexity of the processes occurring in electric heating installations with such electrode electric heaters requires the use of numerical calculation methods.

Keywords: electric heating, multi-zone electrode electric heater-sensor, information signal, temperature, modeling, numerical method.

Введение. Электрическая энергия широко используется для тепловых нужд как в промышленных технологических процессах, так и в коммунально-бытовом секторе. Электронагревательные установки (ЭНУ) небольшой мощности реализуются, как правило, на основе ТЭНов, СВЧ и индукционного нагрева. Для ЭНУ большой мощности, целесообразно применение электродных электронагревателей (ЭЭН), обеспечивающих объемный ввод энергии в нагреваемую среду [1]. Особенно это актуально при обработке сельскохозяйственных термолabileльных сред, у которых интенсивность нагрева ограничивается допустимой температурой и распределением плотности тока в

среде межэлектродного пространства [2]. Кроме того, процессы термообработки термолабильных сред, как правило, быстротечны. Чтобы обеспечить нагрев обрабатываемой среды в соответствии с требованиями технологического процесса, современные ЭНУ оснащаются сложными терморегуляторами, которые обеспечивают реализацию необходимого закона регулирования. Для упрощения системы автоматического регулирования (САР) целесообразно использование электродных электронагревателей-датчиков (ЭЭН-Д). Их применение исключает влияние теплоемкости промежуточного теплоносителя и датчика температуры, кроме того, позволяет получить информационный сигнал (ИС), характеризующий среднеинтегральную температуру в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д [3, 4].

Цель данной статьи – разработать методику расчета конструктивных параметров непроточных электродных электронагревателей-датчиков с плоскопараллельной многозонной электродной системой.

Материалы и методы. Для разработки непроточных ЭНУ целесообразно использовать электротепловую схему (ЭТС) ЭЭН-Д с плоскопараллельной многозонной электродной системой (рисунок 1), которая позволяет обеспечивать заданное распределение плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства [5, 6]. В этом случае электротепловые процессы (ЭТП) в ЭЭН-Д описываются следующей системой уравнений [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p \cdot \rho_c \left(\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v(x) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho_l(\theta_c) \cdot H_k^2}; \\ U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \\ I = \frac{U}{R}; \\ R_k = \left(\int_0^{L_k} \rho_l(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H_k dx \right) / \left(\int_0^{L_k} \Pi dx \cdot L_k^2 \right); \\ R = \sum_{k=1}^N R_k; \\ P = I \cdot U, \end{array} \right. \quad (1)$$

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

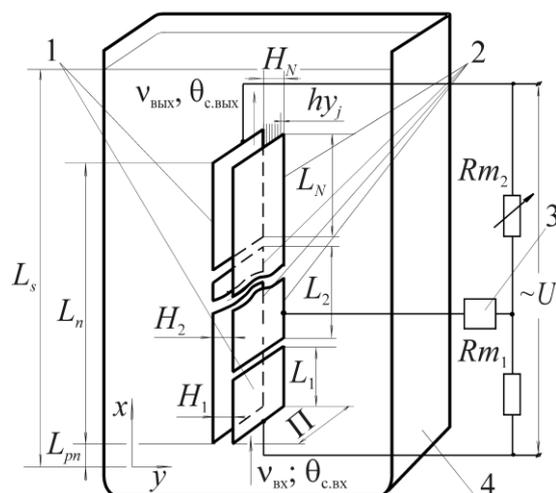
ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

θ_c – температура обрабатываемой среды, °C;

τ – переменная по времени нагрева, с;

$v(x)$ – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на расстоянии x от начала ЭЭН-Д, м/с;

x – переменная по высоте межэлектродного пространства ЭЭН-Д, м;



1 – электроды токоподводящие основные; 2 – электроды промежуточные;
3 – управляющий элемент САР; 4 – емкость с обрабатываемой средой

Рисунок 1 – ЭТС непроточного ЭЭН-Д

с зонированной плоскопараллельной электродной системой:

$v_{вх}, v_{вых}$ – скорость обрабатываемой среды на входе и выходе ЭЭН-Д, м/с; $\theta_{с. вх}, \theta_{с. вых}$ – температура обрабатываемой среды на входе и на выходе ЭЭН-Д, °С; Π – ширина электродов ЭЭН-Д, м; N – количество соединенных последовательно зон нагрева ЭЭН-Д;
 L_1, L_2, \dots, L_N – высота электродов ЭЭН-Д на 1, 2, ..., N -ой соединенной последовательно зоне нагрева, м; H_1, H_2, \dots, H_N – межэлектродное расстояние ЭЭН-Д на 1, 2, ..., N -ой соединенной последовательно зоне нагрева, м; hy_j – толщина условно выделенного слоя обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д, по оси y , ($j=1 \dots J_s$, где J_s – суммарное количество условно выделенных слоев в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д, по оси y), м;
 y – текущая координата межэлектродного расстояния, ЭЭН-Д, м; Rm_1, Rm_2 – постоянное и переменное термонезависимое сопротивление измерительного моста ЭЭН-Д, Ом; U – напряжение питания, В; L_{pm} – расстояние между ЭЭН-Д и дном емкости с обрабатываемой средой, м; L_n – высота ЭЭН-Д, по оси x , м; L_s – высота уровня обрабатываемой среды в емкости для нагрева, м.

U_k – напряжение на k -й зоне ЭЭН-Д ($k = 1, 2, \dots, N$), В;

η – коэффициент полезного действия, о.е.;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м;

H_k – межэлектродное расстояние на k -й зоне ЭЭН-Д, м;

N – количество последовательно соединенных зон (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН-Д);

I – ток ЭЭН-Д, А;

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

U – напряжение питания, В;

R – текущее суммарное сопротивление ЭЭН-Д, Ом;

L_k – длина электродов k -ой зоны ЭЭН-Д, м;

Π – ширина электродов ЭЭН-Д, м;

P – мощность ЭЭН-Д, Вт.

Скорость обрабатываемой среды $v(x)$ в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д определяется путем решения системы уравнений [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_k}{\partial \tau} - \frac{\mu}{\rho_c} \cdot \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} = \beta \cdot g(\theta_{\text{нн}} - \theta_s); \\ v(x) = \frac{1}{J_s} \sum_{j=1}^{J_s} v_{kj}; \\ \theta_{\text{нн}} = \theta_{\text{сн}} + \int_0^{\tau_p} \frac{\Delta\theta_v \cdot v(x) \cdot \Pi \cdot H_N \cdot \rho_c}{M_{\text{нн}}} d\tau; \\ \theta_s = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} \theta_F dx, \end{array} \right. \quad (2)$$

где v_{kj} – скорость обрабатываемой среды на, условно выделенном, вертикальном j -ом слое k -ой зоны ЭЭН-Д, по оси y , м/с;

μ – коэффициент динамической вязкости, Па · с;

β – коэффициент теплового расширения обрабатываемой среды, $1/^\circ\text{C}$;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$\theta_{\text{нн}}$ – температура среды в емкости для нагрева над нагревателем, $^\circ\text{C}$;

θ_s – среднеинтегральная температура среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д, по оси x , $^\circ\text{C}$;

J_s – количество слоев по оси y в каждой секции;

$\theta_{\text{сн}}$ – начальная температура обрабатываемой среды, $^\circ\text{C}$;

τ_p – время нагрева, с;

$\Delta\theta_v$ – превышение температуры на выходе из ЭЭН-Д над температурой обрабатываемой среды в емкости для нагрева над нагревателем, $^\circ\text{C}$;

$M_{\text{нн}}$ – масса обрабатываемой среды в емкости для нагрева над нагревателем ($M_{\text{нн}} = M(L_s - L_n - L_{pn}) / L_s$; $L_s = M / (\rho_c \cdot S_{\text{емк}})$), кг;

M – масса обрабатываемой среды в нагреваемой емкости, м;

L_s – высота уровня обрабатываемой среды в емкости для нагрева, м;

L_n – высота ЭЭН-Д, по оси x , м;

L_{pn} – расстояние от ЭЭН-Д до дна емкости, м;

$S_{\text{емк}}$ – площадь поперечного сечения емкости для нагрева с обрабатываемой средой, м^2 ;

θ_F – температура секций ЭЭН-Д по оси x , превышающая $\theta_{\text{нн}}$ и обеспечивающая возникновение подъемной силы, $^\circ\text{C}$.

Распределение температуры в емкости с нагреваемой средой, вне ЭЭН-Д, находится из уравнения:

$$\frac{\partial \theta_E}{\partial \tau} + v_E \frac{\partial \theta_E}{\partial x_E} - \alpha \frac{\partial^2 \theta_E}{\partial x_E^2} = 0, \quad (3)$$

где θ_E – температура обрабатываемой среды в емкости для нагрева, вне ЭЭН-Д, $^\circ\text{C}$;

v_E – скорость обрабатываемой среды в емкости для нагрева вне ЭЭН-Д
 $(v_E = v(x) \cdot H_N \cdot \Pi / S_{\text{емк}})$, м/с;

α – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Расчет величины информационного сигнала (ИС) в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д ΔU (рисунок 1) проводится по выражению [2, 7]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R}, \quad (4)$$

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

Rm_1, Rm_2 – постоянное и переменное термoneзависимое сопротивление измерительного моста ЭЭН-Д, Ом;

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

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

При расчете ЭЭН-Д определяется суммарное время нагрева среды τ_p . Оно должно быть меньше заданного T_Z , т. е. между τ_p и T_Z разность по абсолютной величине должна быть меньше погрешности расчета ε :

$$|\tau_p - T_Z| = F(\Pi) < \varepsilon, \quad (5)$$

где $F(\Pi)$ – функция, определяющая расчет ширины электродов ЭЭН-Д по времени нагрева, с.

При решении уравнения (5) можно воспользоваться методом Ньютона [8], определяя при этом новое $(n+1)$ -е приближение ширины электродов:

$$\Pi_{n+1} = \Pi_n - F(\Pi_n) / F'(\Pi_n), \quad (6)$$

где производную $F'(\Pi_n)$, в свою очередь, можно определить численно, используя малое приращение ширины электродов $d\Pi$:

$$F'(\Pi_n) = (F(\Pi_n + d\Pi) - F(\Pi_n)) / d\Pi. \quad (7)$$

Результаты исследования. На основе разработанной математической модели составлена блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров ЭЭН-Д (рисунок 2). На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма расчета функции F , определяющей разность по абсолютной величине между реальным временем нагрева ЭЭН-Д τ_p при начальном приближении ширины электродов Π и заданным временем нагрева T_Z , которое определяется требованиями технологического процесса.

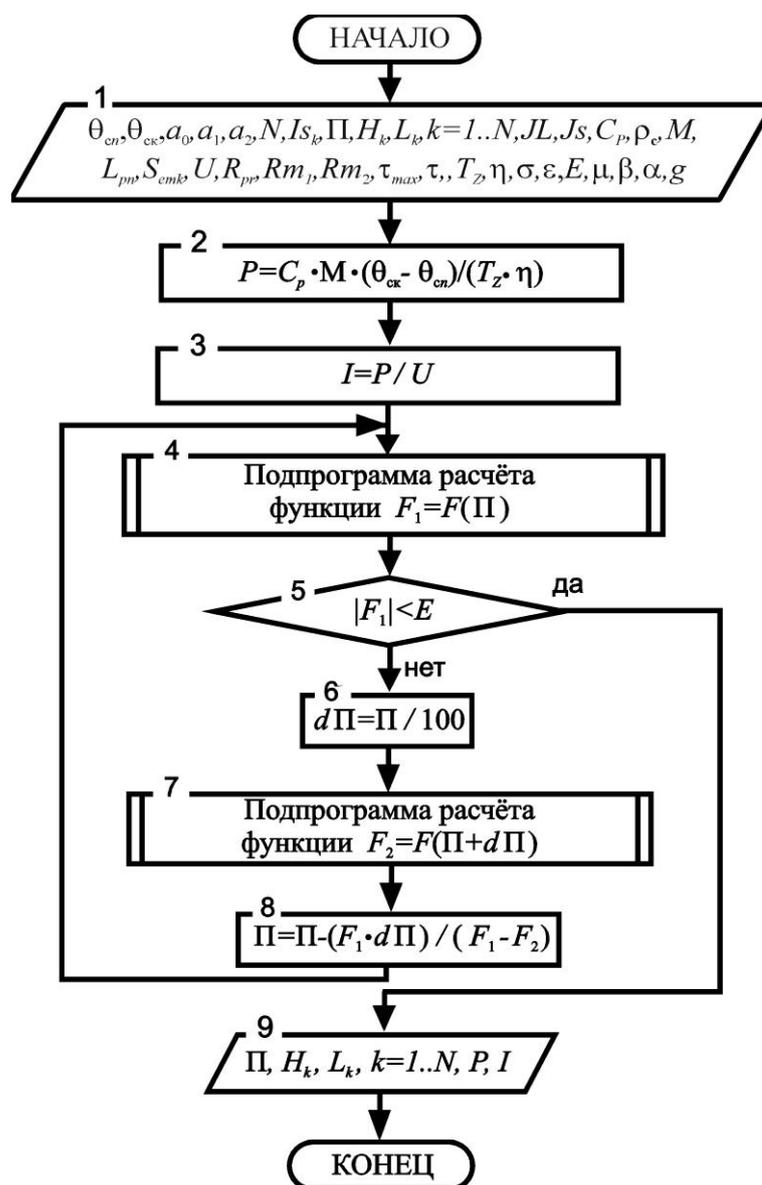


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета ширины электродов непоточного ЭЭН-Д

В приведенных блок схемах алгоритмов дополнительно приняты следующие обозначения:

$\theta_{ск}$ – заданная температура нагрева обрабатываемой среды, °С;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты уравнения $\rho_t = a_0 + a_1 \cdot \theta_c^n + a_2 \cdot \theta_c^{n^2}$, определяющие зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры ее нагрева;

E – погрешность вычислений ширины электродов;

T_z – заданное время нагрева обрабатываемой среды, с;

ϵ – погрешность вычислений температуры и скорости обрабатываемой среды;

JL – количество слоев разностной сетки по высоте емкости (в противоположном направлении оси у);

$d\Pi$ – приращение ширины электродов ЭЭН-Д, м;

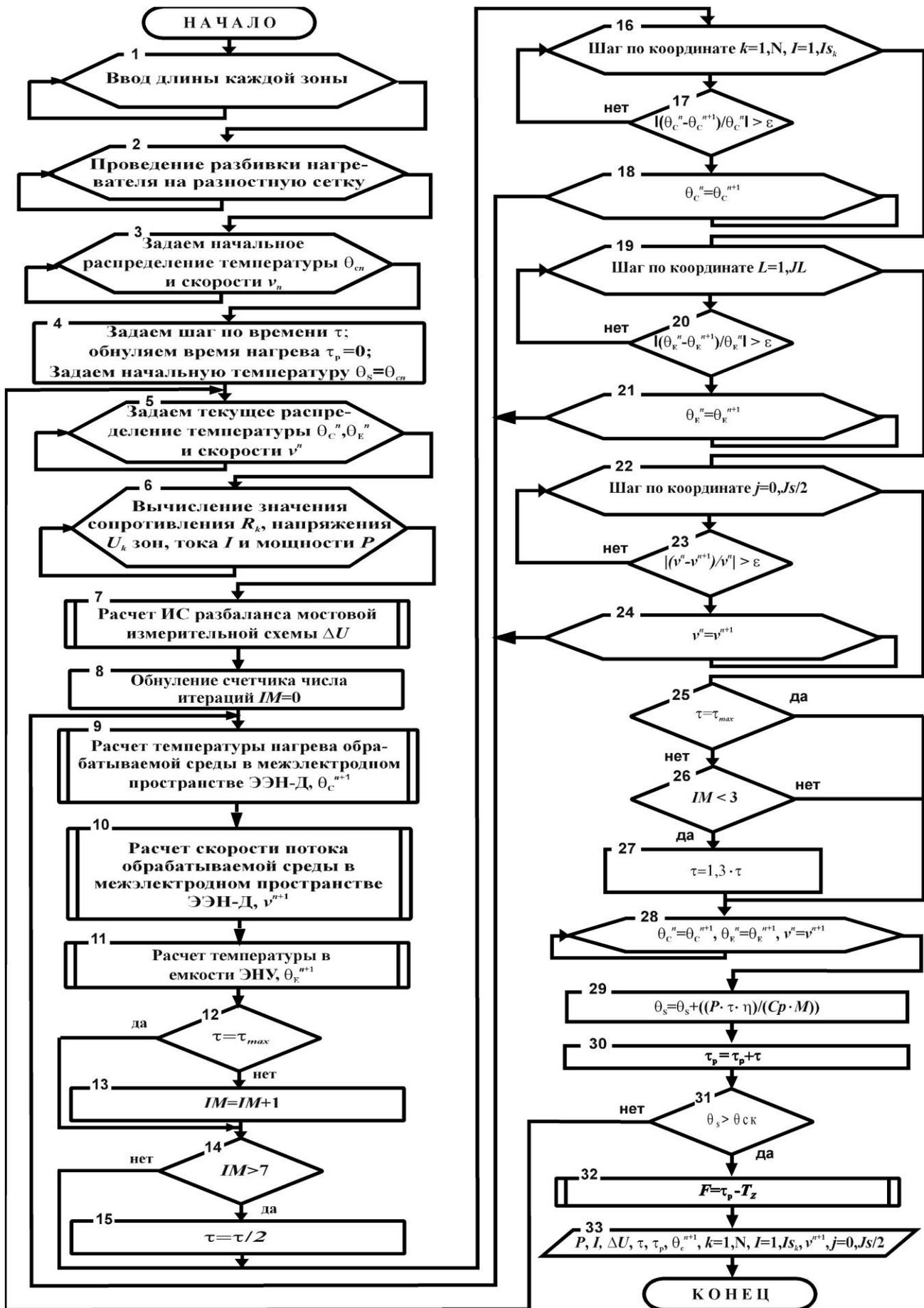


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета функции F

v_n – начальная скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, м/с;

$I s_k$ – число секций в зоне k -й зоне;

IM – число итераций;

θ_c^n – температуры обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

θ_E^n – температура обрабатываемой среды в емкости на n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

v^n – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на n -м расчетном (предыдущем) шаге, м/с;

θ_c^{n+1} – температура обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

θ_E^{n+1} – температура обрабатываемой среды в емкости на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

v^{n+1} – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, м/с.

В блоке 9 блок-схемы алгоритма (рисунок 3) проводится расчет температуры θ_c в ЭЭН-Д путем решения дифференциального уравнения в частных производных, описывающего ЭТП в непроточном ЭЭН-Д с плоскопараллельной многозонной электродной системой конечно-разностным методом. Для этого использовалась методика аппроксимации дифференциального уравнения в виде конечно-разностной схемы, которая преобразовывалась к рекуррентной формуле, обеспечивающей построение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, решаемой методом прогонки [9].

В блоке 10 блок-схемы алгоритма (рисунок 3) проводится расчет скорости обрабатываемой среды v_{kj} в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д на, условно выделенном, вертикальном j -ом слое k -ой зоны ЭЭН-Д, по оси y , путем решения системы дифференциально-интегральных уравнений (2). В блоке 11 блок-схемы алгоритма (рисунок 3) проводится расчет значений температуры θ_E в емкости путем решения дифференциального уравнения в частных производных (3).

При проведении расчетов, температура на входе ЭЭН-Д $\theta_{с.вх}$ принималась равной температуре под нагревателем θ_{pn} . Температура под нагревателем θ_{pn} – равной температуре θ_E у дна емкости. После определения распределения температуры θ_c в ЭЭН-Д, по температуре на его выходе рассчитывалась температура $\theta_{нн}$ (в емкости над нагревателем), которая принималась в качестве начального значения для нахождения температуры θ_E в емкости. В результате расчета распределения значений температуры θ_E в емкости определялась температура θ_{pn} под нагревателем. При расчете температур на следующем конечно-разностном временном слое, указанная последовательность расчета

повторялась [5].

В блоках 4–8 блок-схемы алгоритма (рисунок 2) проводится корректировка ширины электродов ЭЭН-Д по критерию разности между временем нагрева ЭЭН-Д τ_p при начальном приближении ширины электродов Π и заданным временем нагрева T_z , с целью расчета ЭЭН-Д на требуемую мощность P , обеспечивающую нагрев обрабатываемой среды в течении заданного времени T_z .

Обобщая особенности приведенной методики расчета конструктивных параметров непроточных электродных электронагревателей-датчиков с плоскопараллельной многозонной электродной системой, можно отметить, что они требуют применения численных методов решения дифференциально-интегральных уравнений с использованием компьютерной техники.

Заключение. Несмотря на множество возможных вариантов реализации ЭЭН и ЭЭН-Д для непроточных ЭНУ, разработанную методику расчета можно легко адаптировать для расчета конструктивных параметров и других непроточных ЭЭН и ЭЭН-Д. Применение предложенной методики расчета конструктивных параметров непроточных ЭЭН-Д с плоскопараллельной многозонной электродной системой позволяет рассчитать ЭЭН-Д, обеспечивающий нагрев обрабатываемой среды в течении заданного времени, а так же получить одинаковое распределение плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства по ширине электродов и заданное – по длине (высоте), что обеспечивает интенсивность нагрева согласно требований технологического процесса. Многозонный ЭЭН-Д обеспечивает также получение ИС характеризующего среднеинтегральную температуру в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д.

Список 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. – Мн.: БАТУ, – 1999. – 295 с.
3. Прищепов, М.А. Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной электродной системой / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2024. – № 7. – С. 25–32.
4. Прищепов, М.А. Моделирование характеристик емкостного электродного нагревателя-датчика для нагрева термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2004. – №6. – С. 15–22.
5. Прищепов, М.А. К вопросу совершенствования непроточных электродных нагревателей-датчиков с зонированной плоскопараллельной электродной системой / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. №1. – 2002. – С. 9–11.
6. Прищепов, М.А. Функциональные возможности электродных электронагревателей с зонированными электродными системами /

- М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 23–28.
7. Денисов, М.С. Технические измерения и приборы : учебно-практическое пособие / М.С. Денисов – Владимир : Изд-во ВлГУ, – 2021. – 148 с.
8. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., – 1987. – 320 с.
9. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Томск: Изд-во ТПУ. – 2007. – 172 с.