

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ И ЗОНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ

М.А. Прищепов,

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

И.Г. Рутковский,

ст. преподаватель каф. моделирования и проектирования БГАТУ

В статье приведены разработанные методики расчета конструктивных параметров проточных электродных электронагревателей с секционированными и зонированными электродными системами. Отмечено, что сложность происходящих электротепловых процессов в секционированных и зонированных электродных электронагревателях требует использования численных методов расчета.

Ключевые слова: электродный электронагреватель, секционированные электродные системы, зонированные электродные системы, плотность тока, конструктивные параметры.

The article presents the developed methods for calculating the design parameters of flow-through electrode heaters with sectioned and zoned electrode systems. It is noted that the complexity of the ongoing electrothermal processes in sectioned and zoned electrode electric heaters requires the use of numerical calculation methods.

Key words: electrode electric heater, sectioned electrode systems, zoned electrode systems, current density, design parameters.

Введение

Основным технологическим требованием, предъявляемым к электродным электронагревателям (ЭЭН), является обеспечение равномерного или заданного распределения температуры в межэлектродном пространстве обрабатываемой среды [1-4]. Для выполнения этого условия, обеспечивающего качество электротепловой обработки среды, необходимо соблюдать требование по распределению плотности тока в межэлектродном пространстве обрабатываемой среды [5-9]. Однако в связи с существенным разнообразием возможных вариантов реализации указанных ЭЭН необходима разработка типовых методик расчета основных электротепловых схем секцио-

нированных и зонированных ЭЭН, которые можно адаптировать к конкретным электротепловым схемам ЭЭН текучих токопроводящих сред.

Цель данной статьи – разработать типовые методики расчета конструктивных параметров основных электротепловых схем проточных ЭЭН текучих токопроводящих сред с секционированными и зонированными электродными системами.

Основная часть

Электротепловая схема проточного ЭЭН с секционированной системой электродов, имеющей два электрода [3; 5, 6] с переменным сечением межэлектродного пространства, изображена на рисунке 1.

Электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН

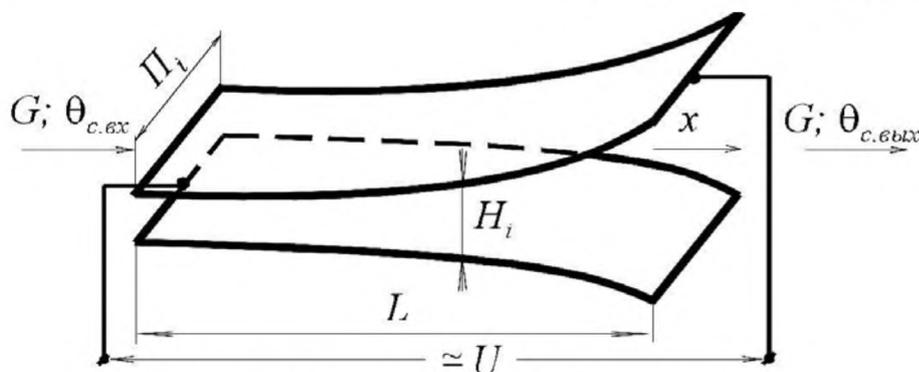


Рисунок 1. Проточный ЭЭН с секционированной системой электродов

вдоль канала протекания среды во времени, описываются следующим дифференциальным уравнением:

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

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

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

H_i – межэлектродное расстояние на i -й секции ЭЭН, м;

Π_i – ширина электродов на i -й секции ЭЭН, м;

θ_c – температура обрабатываемой среды, °C;

G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;

U – напряжение питания, В;

x – текущая координата длины ЭЭН, м;

η – коэффициент полезного действия, о.е.

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м.

Электротепловая схема многозонного (зонируемого) проточного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, образованная тремя (двухзонный ЭЭН) и более электродами [3; 5; 7-9], изображена на рисунке 2.

Электротепловые процессы, происходящие в таких ЭЭН, вдоль канала протекания среды во времени, описываются следующей системой уравнений:

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

где I – мгновенное значение полного тока ЭЭН, А;

R_k – мгновенное значение сопротивления k -й зоны ЭЭН, Ом;

R – мгновенное значение полного сопротивления ЭЭН, Ом;

U_k – мгновенное значение напряжения на k -й последовательно соединенной зоне ЭЭН, В;

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

Π_k – ширина электродов на k -й зоне ЭЭН, м;

L_k – длина электродов k -й зоны ЭЭН, м;

N – количество последовательно соединенных зон на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН.

При расчете конструктивных параметров ЭЭН с секционированной системой электродов [3; 5, 6] (рис. 1) и для многозонного ЭЭН [3; 5; 7-9] (рис. 2) электротепловые процессы, происходящие на i -м элементарном

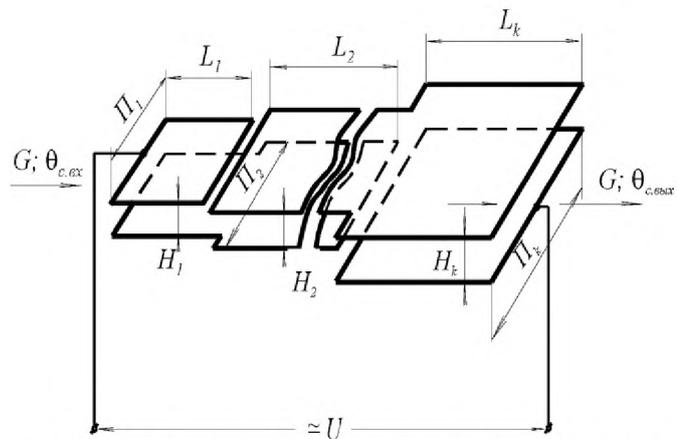


Рисунок 2. Проточный многозонный ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой

участке любой k -й зоны в статике, при $\partial \theta_c / \partial \tau = 0$, описываются дифференциальным уравнением

$$C_p \cdot G \cdot \frac{d \theta_c}{dx} = U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta / (\rho_t(\theta_c) \cdot H_i), \quad (3)$$

где U_i – напряжение питания на i -й секции электронагревателя ($U_i = U$ – при расчете секционированного ЭЭН, $U_i = U_k$ – при расчете многозонного ЭЭН), В;

$\Pi_i = \Pi_k$ – при расчете многозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой;

$H_i = H_k$ – при расчете многозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой.

При расчете многозонного ЭЭН с переменным сечением межэлектродного пространства k -й зоны ЭЭН необходимо использовать двумерные массивы Π_{ik} и H_{ik} , где индекс i означает i -ую секцию k -й зоны.

При расчете конструктивных параметров электродной схемы, приведенной на рисунке 1, по температуре обрабатываемой среды на входе электронагревателя $\theta_{c,ex}$ определяют удельное сопротивление $\rho_t(\theta_c)$, затем по зависимости допустимых значений плотности тока в межэлектродном пространстве от

удельного сопротивления обрабатываемой среды $J_{дон} = f(\rho_t(\theta_c))$ рассчитывают допустимую плотность тока $J_{дон}$. После этого определяют расстояние H_i между электродами для первой секции нагревателя:

$$H_i = \frac{K_3 \cdot U}{J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)}, \quad (4)$$

где K_3 – коэффициент запаса по допустимой плотности тока.

Далее межэлектродное расстояние H_i для последующих секций длиной h рассчитывают аналогично, однако при этом температуру обрабатываемой среды на входе для последующей секции определяют исходя из уравнения (3). Так как подобный расчет требует большого количества вычислений, то наиболее целесообразно проводить его на компьютерной технике, а, соответственно, дифференциальное уравнение (3) решать численно, например, методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Для этого дифференциальное уравнение (3) необходимо привести к виду

$$\frac{d\theta_c}{dx} = \frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G}. \quad (5)$$

Тогда температуру обрабатываемой среды для последующих секций $\theta_{c, i+1}$ рассчитывают по следующей рекуррентной формуле:

$$\theta_{c, i+1} = \theta_{c, i} + \Delta\theta_{c, i}. \quad (6)$$

Приращение температуры обрабатываемой среды $\Delta\theta_{c, i}$ в свою очередь будет определяться по формуле

$$\Delta\theta_{c, i} = \frac{1}{6} \cdot (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}). \quad (7)$$

При этом коэффициенты k_{1i} , k_{2i} , k_{3i} и k_{4i} на каждом шаге вычислений необходимо определять, соответственно, по формулам

$$k_{1i} = h \cdot \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (8)$$

$$k_{2i} = h \cdot \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c + k_{1i}/2) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (9)$$

$$k_{3i} = h \cdot \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c + k_{2i}/2) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (10)$$

$$k_{4i} = h \cdot \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c + k_{3i}) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right), \quad (11)$$

где h – шаг расчета по длине ЭЭН, м.

Расчет проводится до тех пор, пока очередное расчетное значение $\theta_{c, i+1}$ не превысит заданной тем-

пературы обрабатываемой среды на выходе из нагревателя $\theta_{c, вых}$. При этом длина ЭЭН с секционированной электродной системой L (рис. 1) будет равна расчетной длине X (рис. 3). Алгоритм приведенного расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с секционированной электродной системой представлен на рисунке 3.

При описании электротепловых процессов, происходящих в статике, в проточном ЭЭН с зонированной электродной системой (рис. 2) к системе уравнений (2), записанных для i -го участка (секции) любой k -й зоны, необходимо добавить еще одно уравнение для вычисления тока электронагревателя из мощности, полученной теплотехническим расчетом

$$I = C_p \cdot G \cdot (\theta_{c, вых} - \theta_{c, вх}) / (\eta \cdot U), \quad (12)$$

где $\theta_{c, вх}$ – температура на входе в ЭЭН, °С;

$\theta_{c, вых}$ – температура на выходе из ЭЭН, °С.

В процессе решения полученной системы уравнений необходимо следить за тем, чтобы ток во всех последовательно соединенных зонах обрабатываемой среды оставался постоянным и равнялся полученному из уравнения (12). Кроме того, при расчете параметров таких электродных электронагревателей следует анализировать изменения произведения $J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)$ в интервале от $\theta_{c, вх}$ до $\theta_{c, вых}$. Этот анализ необходим для уточнения направления расчета его параметров, с начала или с конца нагревателя, поскольку напряжение U_k на каждой зоне будет определяться по значению межэлектродного расстояния k -й зоны H_k и произведению $J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)$ либо в начале зоны, либо в ее конце по формуле

$$U_k = H_k \cdot J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c) / K_3. \quad (13)$$

Если анализ произведения $J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)$ показывает, что она монотонно возрастает при изменении температуры от $\theta_{c, вх}$ до $\theta_{c, вых}$, то расчет необходимо проводить начиная с начала нагревателя. В этом случае будет выполняться условие: расчетная плотность тока J на любом элементарном участке нагревателя будет меньше или равна допустимой плотности тока $J_{дон}$, т.е. $J \leq J_{дон}$. Если $J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)$ монотонно убывает при указанном изменении температуры, то расчет необходимо вести с конца нагревателя.

Когда функция $J_{дон} \cdot \rho_t(\theta_c)$ убывает или возрастает не монотонно и имеет локальные экстремумы, то порядок расчета определяется как для монотонно изменяющейся функции, но при этом необходимо расчетную плотность тока в межэлектродном пространстве сравнивать с допустимой для каждого элементарного участка (секции) всех зон. Когда расчетная плотность тока превышает допустимую, необходимо увеличить коэффициент запаса по допустимой плотности тока K_3 .

При необходимости обеспечения наилучшей равномерности протекания обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН, расчет проводят при постоянных и равных, для всех последовательно

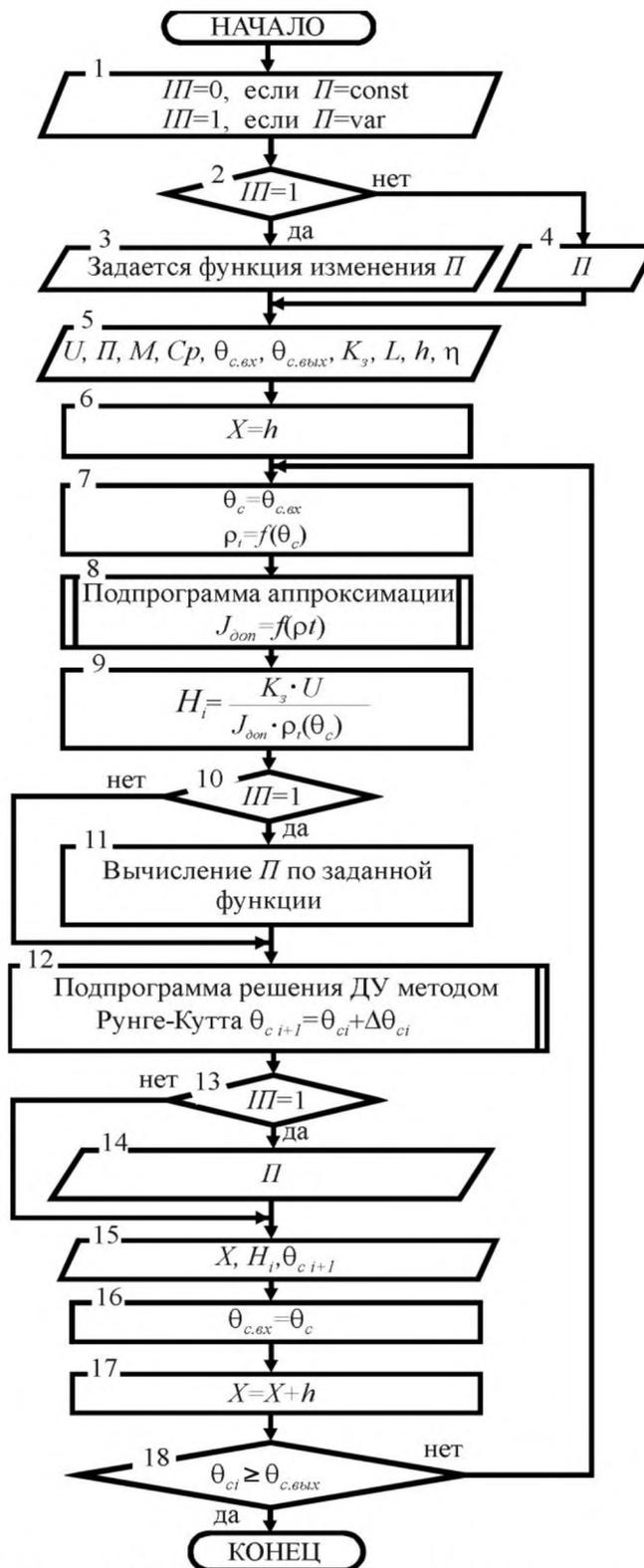


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с секционированной электродной системой: Π – параметр, который определяет варианты расчета конструкции ЭЭН: с постоянной шириной электродов ($\Pi=0$) или с изменяющейся ($\Pi=1$)

соединенных зон ЭЭН, ширине электродов Π_k и межэлектродном расстоянии H_k . При этом напряжение на последней расчетной зоне ЭЭН U_k , полученное по формуле (13), может превышать разность напряжений $(U - U_s)$, (где U_s – суммарное напряжение на $N-1$ рассчитанных зонах нагрева, В). В этом случае напряжение на последней расчетной зоне ЭЭН U_k принимают равное этой разности ($U_k = U - U_s$), что занижает истинное значение плотности тока на элементарных участках (секциях) расчетной зоны по отношению к допустимому. Это в свою очередь приводит к завышению габаритных размеров последней расчетной зоны ЭЭН. Поэтому в данном случае для уменьшения габаритных размеров целесообразно изменять ширину электродов Π_k и (или) межэлектродное расстояние H_k до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение напряжения U_k и $(U - U_s)$. В качестве примера получения равенства указанных напряжений рассмотрим вариант изменения межэлектродного расстояния H_k . Для этого необходимо найти решение нелинейного уравнения, записав его в общем виде следующим образом:

$$(U - U_s) - U_k = F(H_k) = 0. \quad (14)$$

При решении этого уравнения воспользуемся методом Ньютона, рассчитывая при этом $(n+1)$ -е приближение межэлектродного расстояния по формуле

$$H_{k\ n+1} = H_{k\ n} - \frac{F(H_{k\ n})}{F'(H_{k\ n})}, \quad (15)$$

где производную $F'(H_{k\ n})$ можно определить численно, используя достаточно малое приращение межэлектродного расстояния ε , по следующей формуле:

$$F'(H_{k\ n}) = \frac{F(H_{k\ n} + \varepsilon) - F(H_{k\ n})}{\varepsilon}. \quad (16)$$

При вычислении функции $F(H_k)$ в процессе расчета необходимо следить за тем, чтобы плотность тока J по всей длине нагревателя не выходила за пределы допустимой $J_{дон}$, т.е. $J \leq J_{дон}$. Поэтому необходимо контролировать значение плотности тока на каждом элементарном участке (секции) нагревателя.

$$J = \frac{U_k}{H_k \cdot \rho_t(\theta_c)}. \quad (17)$$

В случае, если плотность тока превышает допустимую величину $J \geq J_{дон}$, процесс расчета необходимо останавливать и проводить корректировку исходных данных для продолжения расчета.

На рисунке 4 представлен алгоритм определения межэлектродного расстояния H_k проточного ЭЭН с зонированной электродной системой методом Ньютона. На рисунке 5 представлен алгоритм подпрограммы вычисления функции $F(H_k)$ несовпадения напряжения на последней расчетной зоне, полученного по допустимой плотности тока, и остаточного, равного разности напряжения питания и суммарного напряжения на рассчитанных зонах нагревателя.

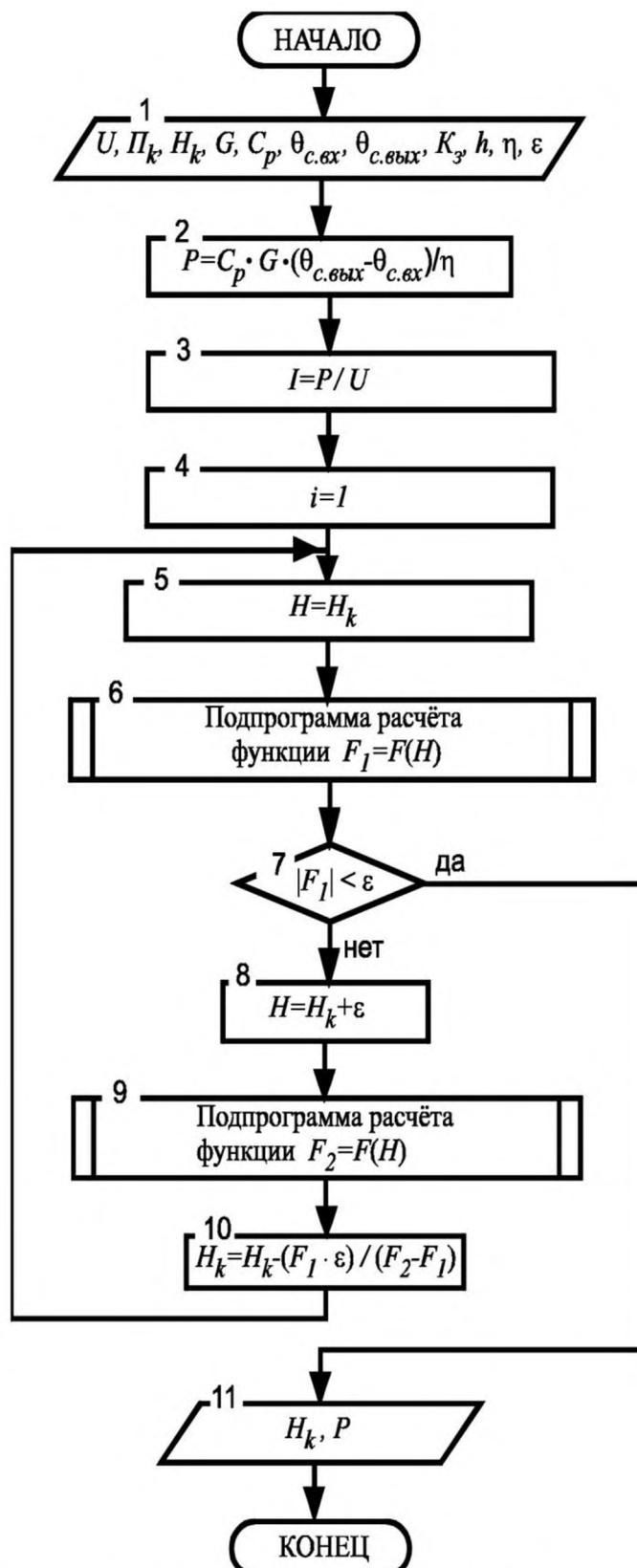


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма определения межэлектродного расстояния проточного ЭЭН с зонированной электродной системой методом Ньютона: F_1, F_2 – функции, определяющие разность напряжений U_k и $(U - U_s)$ (14), при межэлектродном расстоянии H_k и $H_k + \varepsilon$; P – мощность ЭЭН, Вт

В приведенном алгоритме (рис. 5) приняты следующие обозначения:

x – текущая длина расчетной k -й зоны ЭЭН, м;
 P_k – мощность k -й последовательно соединенной

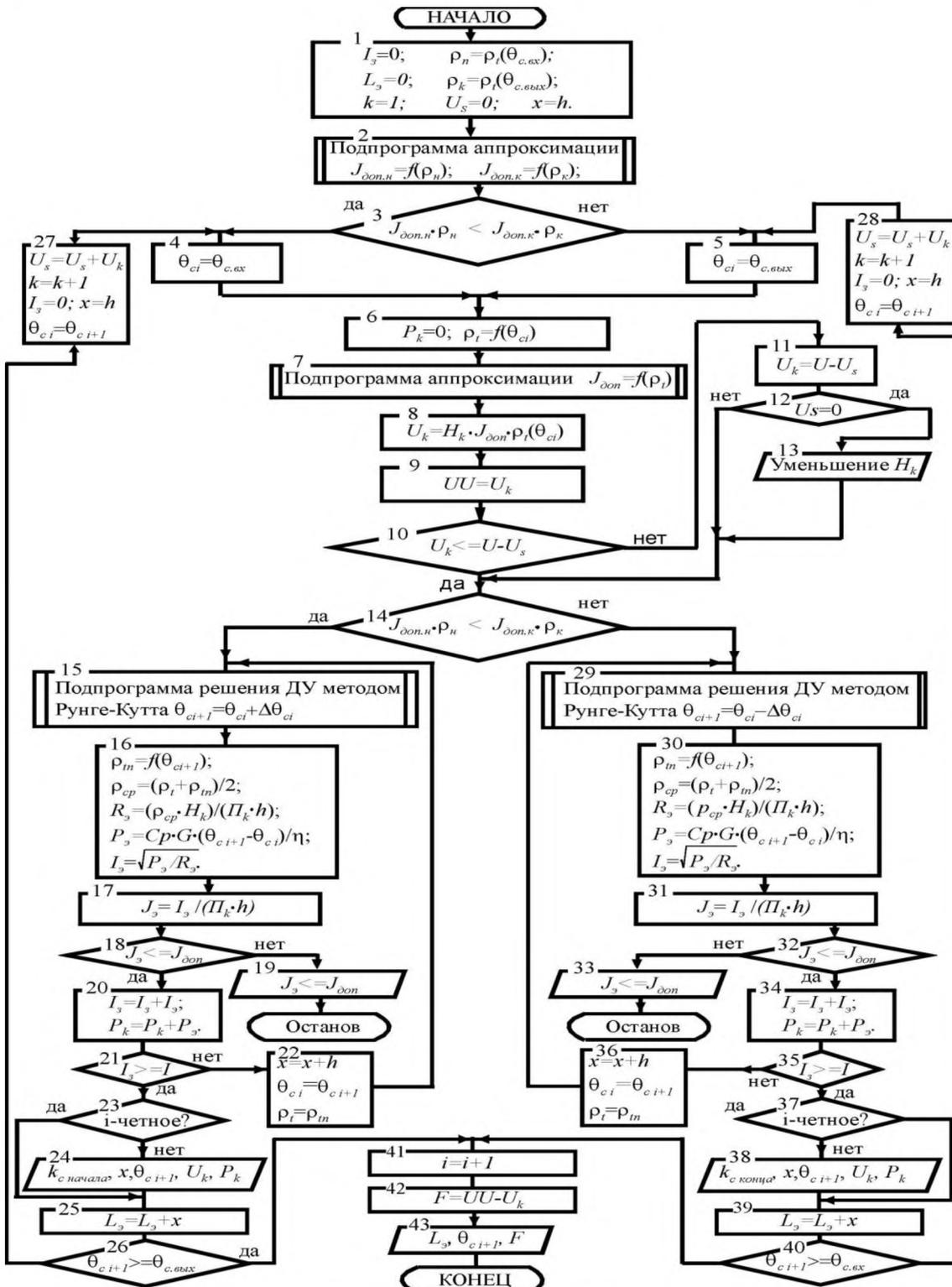


Рисунок 5. Алгоритм подпрограммы вычисления несовпадения напряжения на последней расчетной зоне, полученного по допустимой плотности тока, и остаточного, равного разности напряжения питания и суммарного напряжения на рассчитанных зонах нагревателя

зоны, Вт;

I_3 – ток k -й последовательно соединенной зоны, А;

$\rho_{ср}$ – среднее удельное сопротивление обрабатываемой среды i -го элементарного участка (секции) k -й зоны, Ом·м;

R_3 – сопротивление обрабатываемой среды i -го элементарного участка (секции) k -й зоны, Ом;

P_3 – мощность i -го элементарного участка (секции) k -й зоны, Вт;

I_3 – ток i -го элементарного участка (секции) k -й зоны, А;

J_3 – плотность тока i -го элементарного участка (секции) k -й зоны, А/м²;

L_3 – полная длина электродного электронагревателя, м;

ρ_n – удельное сопротивление при $\theta_{с.вх.}$, Ом·м;

$J_{доп.н}$ – допустимая плотность тока при ρ_n , А/м²;

ρ_k – удельное сопротивление при $\theta_{с.вых.}$, Ом·м;

$J_{доп.к}$ – допустимая плотность тока при ρ_k , А/м²;

$\theta_{с.и}$ – температура i -го элементарного участка (секции) k -й зоны ЭЭН, °С;

$\theta_{с.и+1}$ – температура $i+1$ -го элементарного участка (секции) k -й зоны ЭЭН, °С;

$\rho_{ин}$ – удельное сопротивление на секции $i+1$ ЭЭН, Ом·м;

UU – напряжение на последней расчетной зоне, полученное по формуле (13);

F – функция, определяющая разность напряжений U_k и $(U - U_3)$ (14).

Обобщая особенности приведенных методик расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН с секционированными или зонированными электродными системами, можно отметить, что они требуют проведения большого количества вычислений, т.е. использования компьютерной техники.

Заключение

1. Несмотря на множество возможных вариантов секционирования и зонирования ЭЭН, разработанные методики расчета можно легко адаптировать для расчета конструктивных параметров и других ЭЭН, так как они разработаны для наиболее типичных вариантов их секционирования или зонирования.

2. Применение предложенных методик расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами позволяет уменьшить их материалоемкость минимум на 12...20 %, в сравнении с материала-

емкостью аналогичных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – М.: Колос, 1975. – 384 с.
2. Электротехнология / В.А. Карасенко [и др.]. – М.: Колос, 1992. – 304 с.
3. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства. – Мн.: БАТУ, 1999. – 295 с.
4. Заяц, Е.М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов / Е.М. Заяц. – Мн.: Ураджай, 1997. – 216 с.
5. Герасимович, Л.С. Расчет конструктивных параметров секционированных проточных электродных электронагревателей / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Проблемы развития энергетики и электрификации АПК: сб. науч. тр. / БелНИИ агроэнерг. – Мн, 1994. – С. 35-46.
6. Прищепов, М.А. К вопросу расчета конструктивных параметров секционированных проточных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Сб. трудов отчетной науч.-техн. конф. аспирантов и докторантов БАТУ. – Мн.: БАТУ, 1996. – С. 27-31.
7. Прищепов, М.А. Повышение эффективности электротепловой обработки термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тезисы докладов второй науч.-техн. конф., Гродно, 8–9 октября 1996 г. – Гродно: БИТА, 1996. – С. 189-190.
8. Прищепов, М.А. Повышение эффективности электротепловой обработки термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Материалы, технологии, инструменты. – 1997. – № 1. – С. 52-55.
9. Прищепов, М.А. К вопросу разработки проточных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, А.Н. Кубарко, И.Г. Рутковский // Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2009. – С. 83-89.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.04.2023