

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С ЗОНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ

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 приведено исследование функциональных возможностей электродных электронагревателей с зонированными электродными системами. Показано, что разработанные методики и алгоритмы расчета статических и динамических характеристик основных электротепловых схем электродных электронагревателей-датчиков, обеспечивающие допустимые плотности тока в межэлектродном пространстве нагревателей и заданную интенсивность нагрева сред, на примере обраты молока продемонстрировали высокую адекватность характеристик. Выявленные дополнительные свойства их многофункционального использования позволяют защитить электронагревательные установки от аварийных режимов работы, контролировать образование отложений на электродах и интенсивность кипения.

Ключевые слова: электродный электронагреватель, электродный электронагреватель-датчик, математическая модель, информационный сигнал, аварийный режим работы, отложения на электродах, кипение.

The article presents a study of the functional power of electrode electric heaters with zoned electrode systems. It is shown that the developed methods and algorithms for calculating the static and dynamic characteristics of the main electrode systems of electrode electric heaters-sensors, providing allowable current densities in the interelectrode space of heaters and a given heating intensity of media, using electrothermal treatment of skimmed milk as an example, demonstrated high adequacy of characteristics. The discovered additional properties of their multifunctional use make it possible to protect electric heating installations from emergency operation modes, control the formation of deposits on the electrodes and the boiling intensity.

Key words: electrode electric heater, electrode electric heater with sensor function, mathematical model, information signal, emergency operation, deposits on electrodes, boiling.

Введение

Использование электрической энергии для тепловых нужд на современном этапе непрерывно возрастает. Доля электрического нагрева будет увеличиваться еще больше в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС и применением двухставочных дифференцированных тарифов на электрическую энергию. При получении тепловой энергии в настоящее время широко используется косвенный электронагрев на основе ТЭНов. Однако ограниченная температуропроводность обрабатываемых сред и невысокая допустимая температура на контактной поверхности теплообмена существенно снижают его эффективность. Значительно снизить стоимость и повысить энергоэффективность обработки сельскохозяйственных термолabileльных сред можно применением электронагревательных установок (ЭНУ) с электродными электронагревателями (ЭЭН). При исследованиях, направленных на разработку проточных и непроточных ЭЭН с зонированными электродными

системами, обеспечивающими допустимые плотности тока в межэлектродном пространстве нагревателей и заданную интенсивность нагрева текучих термолabileльных сред, проведен анализ тепловых процессов сельскохозяйственного производства. Анализ показал, что основные тепловые процессы – низкотемпературные, и в большинстве из них возможен объемный ввод тепловой энергии в обрабатываемую среду, то есть прямой электронагрев сопротивлением, который является термозависимым, так как удельное сопротивление практически всех обрабатываемых сельскохозяйственных сред зависит от их температуры. При этом температура и интенсивность нагрева сред ограничиваются допустимой температурой и распределением плотности тока в среде межэлектродного пространства.

В работах Кудрявцева И.Ф., Карасенко В.А., Герасимовича Л.С. и других ученых отмечается, что использование ЭНУ с ЭЭН перспективно во многих технологических процессах сельскохозяйственного производства для тепловой обработки термолabileльных сред

[1-6]. Однако этим не ограничивается их использование, так как они могут выполнять и другие функции.

Цель настоящей работы – обосновать возможности многофункционального использования многозонных ЭЭН.

Основная часть

Так как процессы термообработки термолabileльных сред, как правило, быстротечны, то для упрощения системы автоматического регулирования (САР) температуры ЭЭН необходимо использовать малоинерционные датчики температуры. Вместе с тем зонирование электродной системы позволяет использовать в качестве термочувствительного элемента термозависимое сопротивление нагреваемой среды. При этом измерение ее сопротивления наиболее просто и его с высокой точностью можно производить методом нулевого или дифференциального сравнения. Для этого ЭЭН должен иметь один или несколько промежуточных (дополнительных) электродов и градиент температуры в обрабатываемой среде. Такой ЭЭН будет выполнять функции датчика, и называться электродным электронагревателем-датчиком (ЭЭН-Д). В результате моделирования выявлено, что повышение эффективности работы ЭНУ на базе зонированных или многозонных ЭЭН-Д достигается за счет наличия в них внутренних обратных связей, обеспечивающих перераспределение мощности и контроль температурного поля при нагреве обрабатываемой среды [7].

При создании ЭНУ с заданным распределением плотности тока в среде межэлектродного пространства на базе зонированных ЭЭН-Д рассмотрим электротепловые схемы (ЭТС) ЭЭН-Д с плоскопараллельным исполнением электродных систем (рис. 1), которые обеспечивают наиболее равномерное распределение плотности тока по ширине электродов. Для этих ЭТС разработаны математические модели (ММ) и алгоритмы теоретического исследования их статических и динамических характеристик [6-9].

Зонированные ЭЭН-Д с плоскопараллельными электродами могут иметь различную конфигурацию электродных систем [6-8]. Вместе с тем они будут частным случаем ЭТС (рис. 1).

Электротепловые процессы (ЭТП) в зонированных ЭЭН-Д с плоскопараллельными электродами (рис. 1) описываются следующим уравнением [6, 7]:

$$C_p \cdot \rho_c \left(\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v(x) \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_k^2}, \quad (1)$$

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

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

θ_c – температура обрабатываемой среды, °С;

τ – переменная по времени нагрева, с;

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

η – коэффициент полезного действия, о.е.;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м;

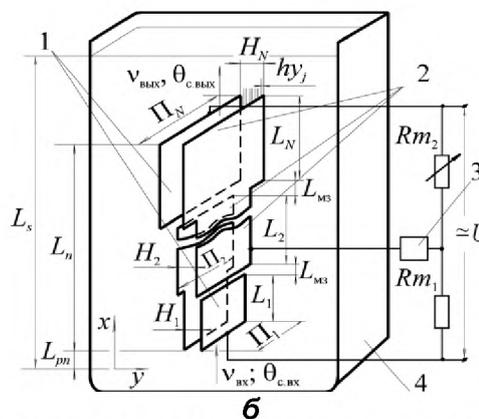
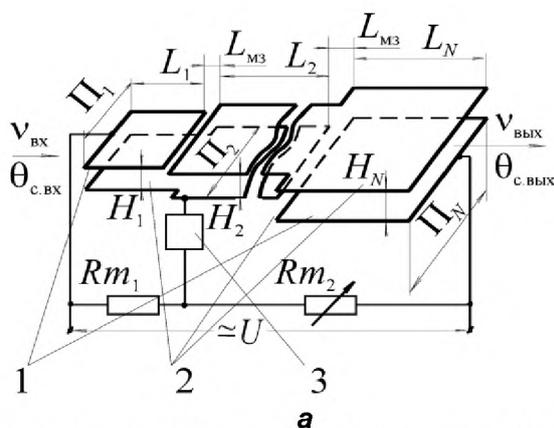


Рисунок 1. ЭТС проточного (а) и непроточного (б) ЭЭН-Д с плоскопараллельной зонированной электродной системой: 1 – основные токоподводящие электроды; 2 – промежуточные электроды; 3 – управляющий элемент САР; 4 – емкость; $v_{вх}$, $v_{вых}$ – скорость обрабатываемой среды на входе и выходе ЭЭН-Д, м/с; $\theta_{с. вх}$, $\theta_{с. вых}$ – температура на входе и выходе ЭЭН-Д, °С; $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$ – ширина электродов на 1, 2, ..., N-й последовательно соединенной зоне ЭЭН-Д, м; N – количество последовательно соединенных зон (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН-Д); L_1, L_2, \dots, L_N – длина электродов на 1, 2, ..., N-й последовательно соединенной зоне ЭЭН-Д, м; H_1, H_2, \dots, H_N – межэлектродное расстояние на 1, 2, ..., N-й последовательно соединенной зоне ЭЭН-Д, м; h_{y_j} – толщина слоя обрабатываемой среды по оси y, ЭЭН-Д ($j=1 \dots J_s$, где J_s – количество слоев в межэлектродном пространстве по оси y), м; y – текущая координата межэлектродного расстояния, ЭЭН-Д, м; R_{m1}, R_{m2} – термнезависимые сопротивления измерительного моста ЭЭН-Д, Ом; U – напряжение питания, В; L_{m3} – расстояние между зонами нагрева, м; L_{pn} – расстояние между ЭЭН-Д и дном емкости, м; L_n – длина ЭЭН-Д, м; L_s – высота уровня обрабатываемой среды в емкости, м.

U_k – напряжение на k -й зоне ЭЭН-Д ($k = 1, 2, \dots, N$), В;
 N – количество последовательно соединенных зон (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН-Д);

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

При описании ЭТП с ЭЭН-Д (рис. 1) к уравнению (1), записанному для k -й зоны, необходимо дополнительно записать систему уравнений для вычисления напряжения U_k на k -й зоне ЭЭН-Д [6, 7]:

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

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

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

R – полное сопротивление ЭЭН-Д, Ом;

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

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

На входе проточного ЭЭН-Д температура $\theta_{с.вх}$ задается по требованиям технологического процесса. Скорость обрабатываемой среды на его входе и на расстоянии x от входа ЭЭН-Д рассчитывается по формуле:

$$v(x) = G / (\rho_c \cdot H(x) \cdot \Pi(x)),$$

где G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;

$H(x)$ – межэлектродное расстояние на удаленности x от начала ЭЭН-Д ($H(x) = H_k$), м;

$\Pi(x)$ – ширина электродов на расстоянии x от начала ЭЭН-Д ($\Pi(x) = \Pi_k$), м.

Температура $\theta_{с.вх}$ на входе для непроточного ЭЭН-Д принимается равной температуре θ_{pn} под нагревателем, в начале нагрева она будет равна начальной температуре $\theta_{с.н}$ обрабатываемой среды. В процессе нагрева температура $\theta_{с.вх}$ будет равняться температуре θ_E у дна емкости, которая определяется из решения уравнения (3) совместно с уравнением (1) [7]:

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

где θ_E – температура обрабатываемой среды в емкости вне ЭЭН-Д, °С;

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

α – коэффициент диффузии, м²/с;

$S_{эмк}$ – площадь поперечного сечения емкости с обрабатываемой средой, м².

Тепловое движение обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве непроточного ЭЭН-Д получим из решения системы уравнений [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_k}{\partial \tau} - \frac{\mu}{\rho_c} \cdot \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} = \beta \cdot g(\theta_{нн} - \theta_{si}); \\ v(x) = \frac{1}{J_s} \sum_{j=1}^{J_s} v_{kj}; \\ \theta_{нн} = \theta_{сн} + \\ + \int_0^{\tau_p} \frac{\Delta \theta_v \cdot v(x) \cdot \Pi(x) \cdot H(x) \cdot \rho_c}{M_{нн}} d\tau; \\ \theta_{si} = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} \theta_F dx, \end{array} \right. \quad (4)$$

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

μ – коэффициент динамической вязкости, Па · с;

β – коэффициент теплового расширения обрабатываемой среды, 1/°С;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\theta_{нн}$ – температура среды над нагревателем, °С;

θ_{si} – среднеинтегральная температура среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д по оси x , °С;

τ_p – время нагрева, с;

$\Delta \theta_v$ – превышение температуры на выходе из ЭЭН-Д над температурой обрабатываемой среды в емкости над нагревателем, °С;

$\theta_{сн}$ – начальная температура обрабатываемой среды, °С;

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

M – масса обрабатываемой среды в нагреваемой емкости, м;

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

Расчет величины информационного сигнала (ИС) в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д ΔU (рис. 1) проводится по выражению [7, 9]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \times \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2} \quad (5)$$

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), описывающего изменение температуры в межэлектродном пространстве, а также дифференциального уравнения (3), описывающего распределение температуры в нагреваемой емкости вне ЭЭН-Д, и дифференциального уравнения системы уравнений (4), которое описывает скорость теплового движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, проводилось конечно-разностным методом. Для этого использовалась методика аппроксимации указанных дифференциальных уравнений в виде конечно-разностных схем, которые преобразовывались к рекуррентным формулам, обеспечивающим построение систем алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, решаемых методом прогонки. Расчет электротепловых процессов в проточном ЭЭН-Д проводился путем совместного решения дифференциального уравнения (1) и системы уравнений (2) [6]. Для расчета электротепловых процессов в непроточном ЭЭН-Д при решении дифференциального уравнения (1) и системы уравнений (2) и (4) находилась температура θ_c на выходе ЭЭН-Д и температура $\theta_{\text{нн}}$ в емкости над нагревателем. При решении дифференциального уравнения (3), описывающего распределение температуры в нагреваемой емкости, в качестве начального значения принималось полученное после решения уравнения (1) значение температуры $\theta_{\text{нн}}$. В результате решения дифференциального уравнения (3) находилось распределение значений температуры θ_E в емкости и температура $\theta_{\text{рн}}$ под нагревателем. При расчете температур на следующем конечно-разностном временном слое указанная последовательность расчета повторялась [7].

Теоретические и экспериментальные исследования ЭТП в зонированных ЭЭН-Д показывают, что их динамические характеристики имеют экспоненциальный вид, на который существенное влияние оказывает температурный коэффициент сопротивления обрабатываемой среды, а также зонирование ЭЭН-Д [6-9].

При разработке ЭЭН-Д необходимо получить наибольшую величину напряжения ИС разбаланса мостовой измерительной схемы. Результаты моделирования показали, что наибольшую величину напряжения ИС можно получить в случае, когда термозависимые сопротивления измерительного моста, сбалансированного в холодном состоянии ЭЭН-Д, будут максимально близки по величине. Это условие выполняется при использовании в качестве измерительного промежуточного электрода, который расположен в средней части ЭЭН-Д. Размещение в одном корпусе нескольких пар электродов может приводить к прохождению тока между электродами соседних зон нагрева. Это увеличивает неравномерность плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства и влияет на величину напряжения ИС. Результаты экспериментальной проверки адекватности разработанных ММ показали, что для снижения взаимного влияния друг на друга соседних зон нагрева

ва расстояние между этими зонами $L_{\text{мс}}$ (рис. 1) необходимо принимать не менее 4 и более межэлектродных расстояний. При этом разработанные ММ позволяют проводить расчет электротепловых характеристик, включая и величину ИС ЭЭН-Д, с погрешностью, не превышающей 8,3% относительно экспериментальных данных, что вполне достаточно при практическом проектировании ЭНУ [6, 7; 9].

Разработка ЭНУ с ЭЭН-Д для нагрева обратного молока показала, что существенное влияние на его удельное сопротивление и ТКС помимо температуры оказывает кислотность и концентрация хлоридов. Увеличение температуры обратного молока приводит к снижению его удельного сопротивления. При повышении кислотности обратного, а также при повышении в нем концентрации хлоридов происходит снижение удельного сопротивления и ТКС [10]. Математическое моделирование статических и динамических электротепловых характеристик непроточных ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой при нагреве обратного молока, учитывающее процесс теплового движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, подтвердило высокую адекватность разработанной ММ (погрешность расчета по отношению к экспериментальным данным не превышает 4,3%).

При расчете конструктивных параметров электродных схем проточных ЭЭН-Д (рис. 1а) вначале определяется температура обрабатываемой среды θ_c , затем удельное сопротивление $\rho_A(\theta_c)$, допустимая плотность тока $J_{\text{доп}}$ ($J_{\text{доп}} = f(\rho_A(\theta_c))$) и межэлектродное расстояние $H(x)$ ($H(x) = K_3 \cdot U(x) / (J_{\text{доп}} \cdot \rho_A(\theta_c))$),

где K_3 – коэффициент запаса по допустимой плотности тока;

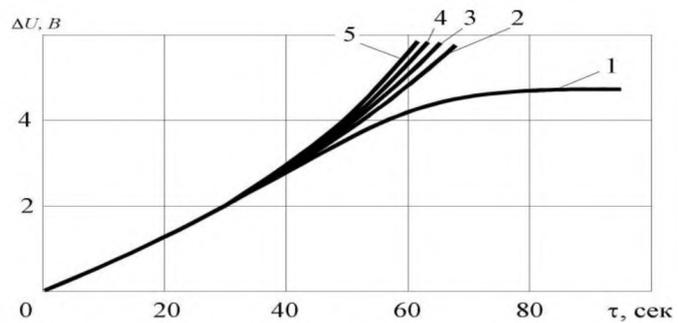
$U(x)$ – напряжение на k -й зоне на расстоянии x от начала ЭЭН-Д, В.

Межэлектродное расстояние $H(x)$ для последующих секций длиной h рассчитывают аналогично, однако при этом температуру обрабатываемой среды на входе для последующей секции определяют исходя из уравнения (1), а напряжение $U(x)$ ($U(x) = U_k$) определяется решением системы уравнений (2) [11].

При расчете непроточного ЭЭН-Д необходимо рассчитать требуемую мощность нагревателя, которая определяет суммарное время нагрева τ_p . Поскольку изменение длины зон нагрева L_1, L_2, \dots, L_N и межэлектродных расстояний H_1, H_2, \dots, H_N оказывает существенное влияние на величину напряжения ИС, то для расчета ЭЭН-Д на требуемую величину мощности допустимо варьировать только шириной электродов $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$. На следующем этапе разработки ЭНУ с ЭЭН-Д проводится уточнение соотношения длины зон нагрева L_1, L_2, \dots, L_N и межэлектродных расстояний H_1, H_2, \dots, H_N с целью получения требуемого (или максимально возможного) значения величины напряжения ИС используя многопараметрическую оптимизацию.

Реализация разработанных алгоритма и программы технико-экономической оптимизации конструктивных параметров многозонного непроточного ЭЭН-Д [12] в ЭНУ подогрева обратного молока с 10 °С до 38 °С для выпойки телят позволила снизить приведенные затраты на 5,6% за счет использования ЭЭН-Д в сравнении с ЭНУ на базе ЭЭН, оснащенной датчиком температуры PT-100(TSP-100), подключенным к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP.

Практическую значимость применения ЭЭН-Д представляет не только мощный ИС о температуре нагрева среды, существенно превосходящий ИС от серийно выпускаемых датчиков температуры, но и дополнительные свойства многофункциональности, являющиеся результатом контроля электротепловых процессов в межэлектродном пространстве с обрабатываемой средой. Например, снижение величины массового расхода обрабатываемой среды ниже допустимой величины, которое является одной из наиболее распространенных причин, приводящих к отклонениям режима нагрева проточных ЭЭН-Д от требований технологического процесса, несложно отлеживать по величине ИС (рис. 2). Образование отложений на электродах ЭЭН-Д приводит к образованию дополнительного электрического сопротивления на границе электрод-среда (рис. 3), что вызывает перераспределение напряжений на зонах ЭЭН-Д, отражается на величине ИС и позволяет контролировать процесс образования отложений на электродах [13]. Кипение сопровождается образованием у верхнего электрода пузырьков пара, которые увеличивают сопротивление смеси вода-пар и приводят к изменению величины ИС разбаланса моста (рис. 4) [14].



1 – $G=0,002$ кг/с; 2 – $G=0,0015$ кг/с; 3 – $G=0,001$ кг/с;
4 – $G=0,0005$ кг/с; 5 – $G=0$ кг/с

Рисунок 2. Зависимости изменения напряжения разбаланса моста ΔU пятизонного ЭЭН-Д во времени τ при:
 $H = 0,006$ м; $\Gamma = 0,04$ м; $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha = -0,009$ 1/°С;
 $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,119$ м;
 $L_4 = 0,114$ м; $L_5 = 0,11$ м

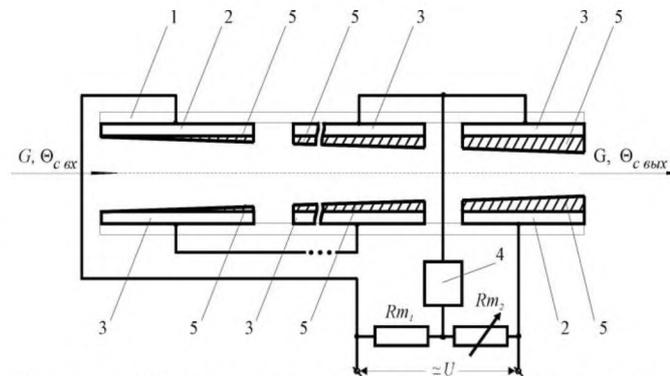
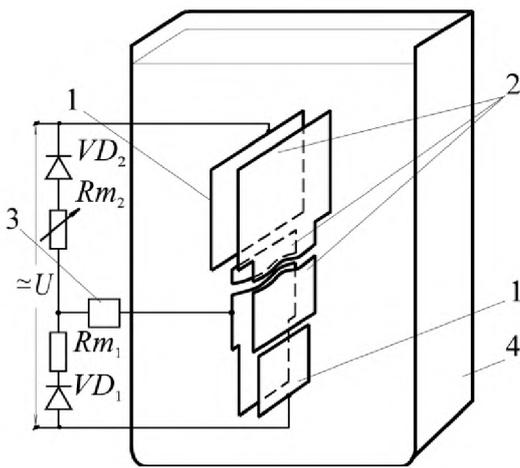


Рисунок 3. ЭТС проточного многозонного ЭЭН-Д с отложениями на электродах: 1 – корпус; 2 – основные токоподводящие электроды; 3 – промежуточные электроды; 4 – отложения на электродах; 5 – управляющий элемент САР; R_{m1} , R_{m2} – термoneзависимые сопротивления измерительного моста



а

б

Рисунок 4. ЭТС непроточного ЭЭН-Д с зонированной электродной системой при работе в режиме кипения (а); изменение ИС ΔU при переходе режима работы ЭЭН-Д от нагрева к кипению (б); 1 – основные токоподводящие электроды; 2 – промежуточные электроды; 3 – управляющий элемент САР; 4 – емкость; R_{m1} , R_{m2} – термoneзависимые сопротивления измерительного моста; VD_1 , VD_2 – диоды для получения ИС о кипении в межэлектродном пространстве

Заключение

1. Разработанные методики и алгоритмы расчета статических и динамических характеристик основных электротепловых схем ЭЭН-Д, обеспечивающие допустимые плотности тока в межэлектродном пространстве нагревателей и заданную интенсивность нагрева сред, показали высокую адекватность характеристик. Для проточного ЭЭН-Д (на примере нагрева воды) погрешность не превысила 8,3% относительно экспериментальных данных. Для непроточного ЭЭН-Д (на примере нагрева обраты молока) погрешность не превысила 4,3% относительно экспериментальных данных.

2. Многопараметрическая оптимизация ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д при подогреве обраты молока с 10 °С до 38 °С для выпойки телят позволила снизить приведенные затраты на 5,6% в сравнении с ЭНУ на базе ЭЭН, оснащенной датчиком температуры PT-100(TSP-100), подключенным к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP.

3. Выявленные дополнительные свойства многофункционального использования ЭЭН-Д позволяют защитить ЭНУ от аварийных режимов работы, контролировать образование отложений на электродах и интенсивность кипения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

1. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – Минск: Колос, 1975. – 384 с.

2. Герасимович, Л.С. Разработка научно-технических основ низкотемпературного поверхностно-распределенного электронного нагрева в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Л.С. Герасимович. – Челябинск, 1982. – 45 с.

3. Шишнина, Н.Г. Сравнительная характеристика электродных водонагревателей для сельскохозяйственного производства / В.А. Глухарев, Н.Г. Шишнина // Вестник Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. – 2007. – № 2. – С. 48-50.

4. 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.

5. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронного нагрева в технологических

процессах сельскохозяйственного производства / М.А. Прищепов. – Минск: БАТУ, 1999. – 295 с.

6. 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: сб. науч. тр. / БелНИИагроэнерго. – Минск, 1994. – С. 17-25.

7. 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.

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. 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.

10. Прищепов, М.А. Исследование температурной зависимости удельного сопротивления обраты молока при изменении его кислотности и содержания в нем хлорида натрия / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2023. – № 1. – С. 35-40.

11. Прищепов, М.А. Расчет конструктивных параметров проточных электродных электронагревателей с секционированными и зонированными электродными системами / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2023. – № 2. – С. 16-22.

12. Прищепов, М.А. Техничко-экономическая оптимизация параметров электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.И. Гургенидзе, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2006. – № 3. – С. 20-24.

13. Прищепов, М.А. Математическое моделирование работы проточных многозонных электродных электронагревателей-датчиков при наличии отложений на электродах / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2023. – № 5. – С. 23-31.

14. Электронагреватель токопроводящих сред: пат. ВУ 13705 / М.А. Прищепов, А.Н. Кубарко, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 29.07.2010.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 07.12.2023