

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОТОЧНЫХ МНОГОЗОННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОДАХ

М.А. Прищепов,

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

И.Г. Рутковский,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

При электродном нагреве на электродах нагревателя неизбежны отложения, которые могут вызвать нарушение режима тепловой обработки и ухудшить качество обрабатываемой среды. Использование многозонных электродных электронагревателей-датчиков позволяет контролировать процесс образования отложений на электродах во времени и проводить своевременное отключение электродных электронагревателей для очистки электродов от отложений. В статье проведено математическое моделирование работы многозонного электродного электронагревателя-датчика в процессе увеличения количества отложений на электродах и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: электродный электронагреватель-датчик, отложения обрабатываемой среды, математическая модель, алгоритм расчета, численное решение, информационный сигнал.

During electrode heating the heater electrodes are inevitably exposed to deposits, which can cause heat treatment disturbance and deteriorate the quality of the medium being treated. The use of multi-zone electrode electric heater-sensors allows to control the process of deposit accumulation on electrodes in time and to carry out timely disconnection of electrode electric heaters for the purpose of cleaning of the electrodes from deposits. The article contains mathematical modeling of the multi-zone electrode electric heater-sensor operation in the process of increasing the amount of electrode deposits and comparing the results of modeling with the experimental data.

Key words: electrode electric heater-sensor, deposits of the medium being treated, mathematical model, calculation algorithm, numerical solution, information signal.

Введение

При электродном нагреве негативное влияние на термообработку сельскохозяйственных термолабильных сред оказывают отложения на электродах. В работах Маслова А.М., Васильевой Л.В., Карницкого Н.Б. и других приводится информация о том, что при обработке молочных продуктов, фруктовых и овощных соков, кормов и пищевых отходов отложения на электродах неизбежны [1-8]. Маслов А.М. и Зимняков А.М. отмечают, что по влиянию на электротепловую обработку их можно разделить на две группы [1; 5]:

1) мягкий, пушистый налет из денатурированного белка, который образуется при небольшом перегреве и легко удаляется;

2) пригар, похожий на камень, который состоит из денатурированного белка, волокон клетчатки, цементированных солями, образуется при сильном перегреве и плохо удаляется.

Утверждение о том, что распределение образующихся отложений практически не поддается теоретическому моделированию, приводится в работах Маслова А.М. и Балабан-Ирменин Ю.В. [1; 7]. По-

этому исследования должны проводиться экспериментально, на реальной установке, для конкретных режимов работы, так как при разработке электродного электронагревателя-датчика (ЭЭН-Д) невозможно учесть все факторы, которые влияют на образование отложений на электродах, поскольку некоторые факторы определяются технологическими требованиями, а другие зависят от свойств продукта.

Целью данной работы является исследование работы многозонного ЭЭН-Д при отложениях обрабатываемой среды на электродах, а также обоснование возможности контроля процесса образования отложений во времени для своевременной очистки электродов.

Основная часть

Для исследования работы проточного многозонного ЭЭН-Д при образовании отложений на электродах была разработана его экспериментальная установка [9]. Поскольку распределение толщины отложений по длине электродов зависит от различных факторов и, как правило, возрастает с увеличением температуры к выходу из ЭЭН-Д, то для определения

температурной зависимости удельного сопротивления (проводимости) отложений на электродах и распределения их толщины по длине выделялись отдельные участки электродов для проведения измерений. Для этого каждый из электродов ЭЭН-Д был разделен на четыре одинаковых участка. Электроды изготовленного ЭЭН-Д имели следующие размеры: $H=0,006$ м; $\Pi=0,04$ м; $L_1=L_2=L_3=L_4=0,04$ м; $L_5=L_6=L_7=L_8=0,0315$ м; $L_9=L_{10}=L_{11}=L_{12}=0,03$ м (рис. 1).

При экспериментальных исследованиях в ЭЭН-Д использовалась водопроводная вода с электрической проводимостью $\gamma_{0\text{oc}} = 0,02149$ Ом·м и температурным коэффициентом проводимости $\alpha_{\Pi\text{oc}} = 0,0274$ 1/°С, теплоемкостью $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С) и плотностью $\rho_c = 1000$ кг/м³. Для температуры обрабатываемой среды (воды) на входе в ЭЭН-Д $\theta_{c\text{ax}} = 20$ °С, при массовом расходе обрабатываемой среды $G = 0,003$ кг/с температура на выходе поддерживалась $\theta_{c\text{ax}} = 70$ °С путем регулирования напряжения питания. При работе ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах напряжение питания составило: $U = 220$ В. Измерительный мост образован термoneзависимыми сопротивлениями Rm_1 , Rm_2 и термозависимыми сопротивлениями участков ЭЭН-Д, которые вычислялись как сумма сопротивлений зон нагрева – Rm_3 и Rm_4 . При этом с точки соединения термoneзависимых сопротивлений Rm_1 и Rm_2 и второго (по ходу движения обрабатываемой среды) промежуточного электрода снимался информационный сигнал ΔU (ИС). Измерительный мост балансировался при отсутствии отложений на электродах и температуре обрабатываемой среды (воды) на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{ax}} = 70$ °С. Суммарное значение дополнительных сопротивлений Rm_1 и Rm_2 составляло 6700 Ом. К измерительной диагонали моста подключался электроизмерительный прибор с внутренним сопротивлением 10000 Ом.

В ходе эксперимента на электродах ЭЭН-Д образовывались отложения, что привело к изменению сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы ΔU . Для поддержания заданной температуры на выходе из ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ регулировалось напряжение питания U .

При проведении экспериментальных исследований проводился визуальный контроль образования отложений через прозрачные боковые стенки ЭЭН-Д из оргстекла. Периодически проводилась разборка нагревателя и измерение расстояния между образовавшимися отложениями, а также толщины отложений. По величине напряжения и тока определялось общее сопротивление обрабатываемой среды и отложенный на участках электродов ЭЭН-Д. С учетом измеренного расстояния между образующимися отложениями определялось сопротивление обрабатываемой среды.

Анализ экспериментальных данных напряжений на зонах нагрева и токов на участках электродов ЭЭН-Д показал, что электрическая проводимость $\gamma_{0\text{oc}}$ и температурный коэффициент проводимости $\alpha_{\Pi\text{oc}}$ отложений на электродах, как по длине нагревателя, так и по времени его работы, существенно не меняются ($\gamma_{0\text{oc}} = 0,02386$ Ом·м, $\alpha_{\Pi\text{oc}} = 0,01069$ 1/°С). Это значит, что при данном режиме нагрева в исследуемом диапазоне образования отложений структура кальциево-магниевого отложений также существенно не меняется.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что количество отложений на электродах увеличивается к выходу из электронагревателя. Через 300 часов работы ЭЭН-Д толщина отложений на выходе электронагревателя достигала 0,98 мм. В результате математической обработки экспериментальных данных получено выражение изменения распределения толщины отложений $H_{r\text{oc}}$ по длине ЭЭН-Д в зависимости от времени его работы:

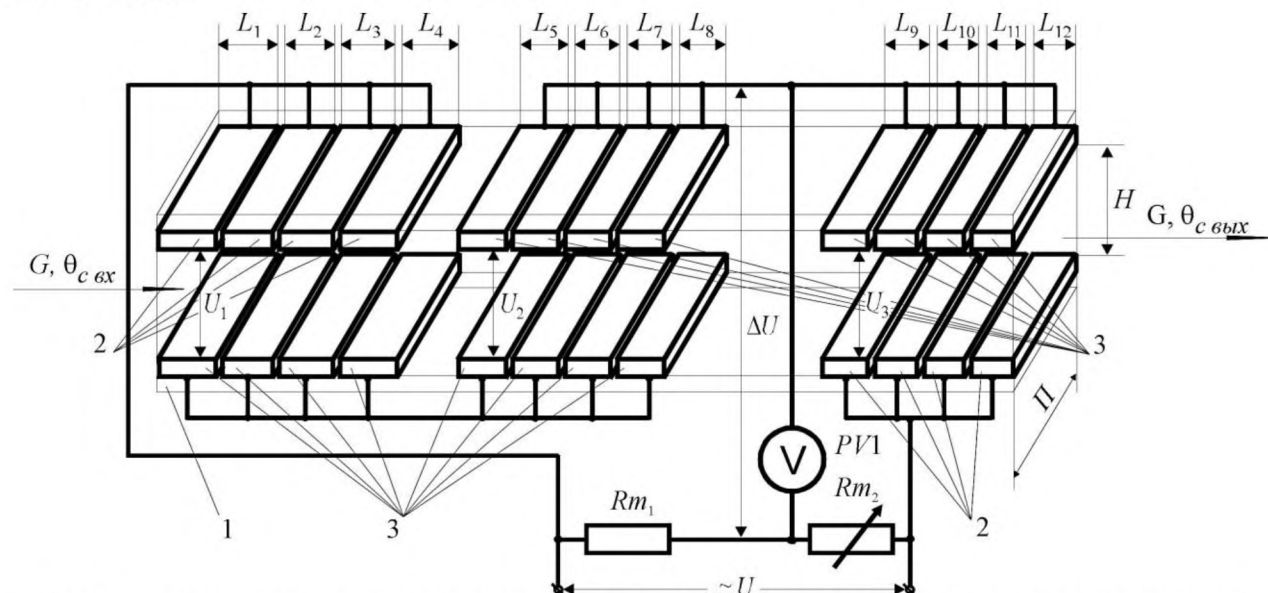


Рис. 1. Экспериментальная установка проточного многозонного ЭЭН-Д для исследования электротепловой обработки при образовании отложений на электродах: 1 – корпус; 2 – основные токоподводящие электроды; 3 – промежуточные электроды; Rm_1 , Rm_2 – термoneзависимые сопротивления измерительного моста; PV1 – вольтметр

$$H_{r_{oc}} = -1,31302 \cdot 10^{-4} \cdot x - 4,12754 \cdot 10^{-9} \cdot T_s + 1,25701 \cdot 10^{-10} \cdot T_s^2 + 7,58279 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot T_s, \quad (1)$$

где x – переменная по длине ЭЭН-Д, м;
 T_s – время наработки ЭЭН-Д, ч.

При небольшой разнице температур обрабатываемой среды θ_c и отложений обрабатываемой среды θ_{oc} влияние величины отложений на температуру нагрева обрабатываемой среды j -й секции электронагревателя осуществляется преимущественно за счет снижения величины напряжения U_{cj} . Влияние теплотерь на температуру обрабатываемой среды θ_c можно учесть в величине КПД. С учетом приведенных допущений, процесс нагрева среды во времени, с наличием отложений на электродах на элементарном участке δx в ЭЭН-Д описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} C_p \cdot \rho_c \cdot H_{cj} \cdot \Pi \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \\ = \frac{U_{cj}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}; \\ C_{p_{oc}} \cdot M_{ocj} \cdot \frac{\partial \theta_{oc}}{\partial \tau} = \frac{U_{ocj}^2 \cdot \Pi \cdot h}{\rho_{t_{oc}}(\theta_{ocj}) \cdot H_{ocj}} - \\ - k_o \cdot F_s \cdot (\theta_{ocj} - \theta_{cj}), \end{cases} \quad (2)$$

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

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

H_{cj} – межэлектродное расстояние на j -й секции ЭЭН-Д, м;

j – номер секции с начала ЭЭН-Д;

Π – ширина электродов ЭЭН-Д, м;

θ_c – текущая температура обрабатываемой среды, °C;

τ – текущее время нагрева, с;

G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;

U_{cj} – напряжение в межэлектродном пространстве, свободном от отложений, на j -й секции ЭЭН-Д, В;

η – коэффициент полезного действия, о.е.;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м;

$C_{p_{oc}}$ – удельная теплоемкость отложений на электродах ЭЭН-Д, Дж/(кг·°C);

M_{ocj} – масса отложений на j -й секции ЭЭН-Д, кг;

θ_{oc} – текущая температура отложений на электродах, °C;

U_{ocj} – напряжение на отложениях двух электродов j -й секции ЭЭН-Д, В;

h – длина j -й секции ЭЭН-Д (равна длине элементарного участка δx), м;

$\rho_{t_{oc}}$ – удельное сопротивление отложений на электродах, Ом·м;

H_{ocj} – толщина отложений в межэлектродном пространстве на двух электродах j -й секции ЭЭН-Д ($H_{ocj} = 2 \cdot H_{r_{ocj}}$), м;

k_o – коэффициент теплоотдачи от отложений в обрабатываемую среду, Вт/(м²·°C);

F_s – площадь поверхности теплоотдачи отложений j -й секции электронагревателя в обрабатываемую среду, м².

Во втором уравнении системы (2), описывающем тепловыделения в отложениях, выразим массу отложений на j -й секции нагрева через их плотность ($M_{ocj} = \rho_{oc} \cdot \Pi \cdot h \cdot H_{ocj}$);

где ρ_{oc} – плотность отложений на электродах ЭЭН-Д, полученных при нагреве водопроводной воды, кг/м³).

Площадь теплоотдачи F с поверхности отложений на электродах ЭЭН-Д в обрабатываемую среду межэлектродного пространства выразим через конструктивные размеры электродной системы ($F = 2 \cdot \Pi \cdot h$). Тогда уравнение системы (2), описывающее тепловыделения в отложениях, запишется следующим образом:

$$C_{p_{oc}} \cdot \rho_{oc} \cdot \Pi \cdot H_{ocj} \cdot \frac{\partial \theta_{oc}}{\partial \tau} = \frac{U_{ocj}^2 \cdot \Pi}{\rho_{t_{oc}}(\theta_{ocj}) \cdot H_{ocj}} - 2 \cdot k_o \cdot \Pi \cdot (\theta_{ocj} - \theta_{cj}). \quad (3)$$

В уравнении (3) зависимость удельного сопротивления отложений от температуры запишем через их проводимость и ТКП ($\rho_{t_{oc}}(\theta_{ocj}) = 1/(\gamma_{0_{oc}} \cdot (1 + \alpha_{\Pi_{oc}}(\theta_{ocj})))$). Для установившегося режима нагрева, при $\partial \theta_{oc} / \partial \tau = 0$, уравнение (3) примет вид:

$$U_{ocj}^2 \cdot \frac{\Pi}{H_{ocj}} \cdot \gamma_{0_{oc}} \cdot (1 + \alpha_{\Pi_{oc}}(\theta_{ocj})) - 2 \cdot k_o \cdot \Pi \cdot (\theta_{ocj} - \theta_{cj}) = 0. \quad (4)$$

Раскрыв скобки и выполнив арифметические преобразования, из уравнения (4) выразим температуру отложений θ_{oc} :

$$\theta_{ocj} = \left(\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0_{oc}}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{cj} \right) / \left(1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0_{oc}} \cdot \alpha_{\Pi_{oc}}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} \right). \quad (5)$$

Далее запишем систему уравнений, позволяющую найти совместное решение первого уравнения системы (2) и уравнения (5) для определения распределения температуры в обрабатываемой среде θ_c и в отложениях обрабатываемой среды на электродах θ_{oc} :

$$\left\{ \begin{aligned} & C_P \cdot \rho_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_P \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \\ & = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}) \cdot H_{c_j}}; \\ & \theta_{ocj} = \left(\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{c_j} \right) / \\ & / \left(1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc} \cdot \alpha_{П OC}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} \right); \\ & U_{Zk} = \sum_{k=1}^N I \cdot R_{Zk}; \\ & I = U / R; \\ & R = \sum_{k=1}^N R_{Zk}; \\ & H_{rocj} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot T_s + \\ & + A_4 \cdot T_s^2 + A_5 \cdot x \cdot T_s; \\ & H_{ocj} = 2 \cdot H_{rocj}; \\ & R_{ocj} = H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) / (h \cdot \Pi); \\ & R_{cj} = H_{cj} \cdot \rho_t(\theta_{cj}) / (h \cdot \Pi); \\ & U_{ocj} = U_{Zk} \cdot R_{ocj} / (R_{cj} + R_{ocj}); \\ & U_{cj} = U_{Zk} \cdot R_{cj} / (R_{cj} + R_{ocj}); \\ & R_{Zk} = \int_0^{L_k} \frac{H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) + H_{cj} \cdot \rho_t(\theta_{cj})}{h \cdot \Pi} dx, \quad (6) \end{aligned} \right.$$

где U_{Zk} – значение напряжения k -й зоны ЭЭН-Д, В;
 I – значение тока ЭЭН-Д, А;
 R_{Zk} – значение сопротивления k -й зоны ЭЭН-Д, Ом;
 R – значение суммарного сопротивления ЭЭН-Д, Ом;
 R_{ocj} – значение сопротивления отложений на
обоих электродах j -й секции ЭЭН-Д, Ом;

R_{cj} – значение сопротивления обрабатываемой
среды между электродами на j -й секции ЭЭН-Д, Ом.

Для решения первого уравнения системы (6) за-
пишем его в следующем конечно-разностном виде
согласно [10]:

$$\begin{aligned} & C_P \cdot \rho_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_j}^n}{\tau} + C_P \times \\ & \times G \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h} = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}^n) \cdot H_{c_j}}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\theta_{c_j}^{n+1}$ – температуры обрабатываемой среды (во-
ды) на j -й секции, $n+1$ – м расчетном (текущем) шаге, °С;

$\theta_{c_j}^n$ – температуры обрабатываемой среды (воды)
на j -й секции n – м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

$\theta_{c_{j-1}}^{n+1}$ – температуры обрабатываемой среды (во-
ды) на $j-1$ -й секции, $n+1$ – м расчетном (текущем)
шаге, °С.

Далее, с учетом скорости обрабатываемой среды
в межэлектродном пространстве на j -й секции ЭЭН-Д
($v_{cj} = G / (\rho_c \cdot H_{cj} \cdot \Pi)$) преобразуем уравнение (7) к сле-
дующему виду:

$$\frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_j}^n}{\tau} + v_{cj} \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h} = F_{cj}^n, \quad (8)$$

$$\text{где } F_{cj}^n = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}^n) \cdot H_{c_j}^2 \cdot C_P \cdot \rho_c}. \quad (9)$$

После математических преобразований из урав-
нения (8) получим следующее разностное уравнение:

$$\theta_{c_j}^{n+1} = \frac{\tau \cdot h \cdot F_{cj}^n + h \cdot \theta_{c_j}^n + \tau \cdot v_{cj} \cdot \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h + \tau \cdot v_{cj}}. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) используем итера-
ционный метод. Итерационный процесс прекращает-
ся при выполнении условия:

$$\max_j \left(\frac{|\theta_{c_j}^{m+1} - \theta_{c_j}^m|}{\theta_{c_j}^m} \right) \leq \varepsilon_\theta, \quad (11)$$

где $j = 1..K_{ZN}$; K_{ZN} – номер последней секции N -й

зоны ЭЭН-Д $\left(K_{ZN} = \sum_{k=1}^N L_k / h \right)$;

ε_θ – погрешность вычислений температуры обра-
батываемой среды (воды).

Расчет напряжения разбаланса мостовой измери-
тельной схемы ΔU проводится по формуле [11]:

$$\begin{aligned} & \Delta U = U \cdot R_{pr} \cdot \left((Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1) \times \right. \\ & \times (Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \times \\ & \left. \times Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R) \right)^{-1}, \quad (12) \end{aligned}$$

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

Rm_1, Rm_2 – термнезависимые сопротивления мостовой измерительной схемы, Ом;

Rm_3, Rm_4 – термозависимые сопротивления участков ЭЭН-Д, которые входят в мостовую измерительную схему и вычисляются как сумма сопротивлений зон нагрева, Ом;

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

Для определения времени наработки ЭЭН-Д с момента включения без отложений на электродах до времени остановки для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды T_S первоначально моделируем работу ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах. При этом измерительный мост балансируется при установившейся температуре на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$. При увеличении времени наработки ЭЭН-Д T_S происходит увеличение количества отложений на электродах H_{roc} . Поддержание величины температуры на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ на уровне θ_{ZAD} проводится путем увеличения напряжения питания U_N методом Ньютона.

Для расчета функции корректировки напряжения питания ЭЭН-Д $F(U_N)$ рассчитывается разность между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} (заданной по требованиям технологического процесса). При этом разность между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} должна стремиться к нулю.

$$\theta_{c\text{вых}} - \theta_{ZAD} = F(U_N) \rightarrow 0. \quad (13)$$

При проведении корректировки температуры на выходе ЭЭН-Д новое $(n+1)$ -е приближение напряжения питания ЭЭН-Д U_{N+1} определяется по формуле:

$$U_{N+1} = U_N - F(U_N) / F'(U_N), \quad (14)$$

где производную $F'(U_N)$ определяем численно, используя достаточно малое приращение напряжения питания ЭЭН-Д ε_U по формуле

$$F'(U_N) = (F(U_N + \varepsilon_U) - F(U_N)) / \varepsilon_U. \quad (15)$$

Реализация алгоритма с определением времени наработки ЭЭН-Д T_S до очистки электродов от отложений обрабатываемой среды приведена на рис. 2.

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма (рис. 2) приняты следующие обозначения: K_{zk} – номер последней секции k -й зоны

$$\text{ЭЭН-Д} \left(K_{zk} = \sum_{kp=1}^k L_{kp} / h \right),$$

где kp – номер зоны ЭЭН-Д, от начала до k -й расчетной;

$N_{zk} = K_{zk-1} + 1, (k=2..N)$ – номер первой секции k -й зоны ЭЭН-Д (для 1-й зоны $K_{z1} = 1$);

ΔT_S – шаг моделирования суммарного времени наработки ЭЭН-Д, ч;

ε_N – погрешность вычислений разности между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} (заданной по требованиям технологического процесса);

ΔU_{ZAD} – напряжение разбаланса мостовой измерительной схемы при достижении толщины отложений на электродах определенной величины, после которой необходимо отключить ЭЭН-Д для очистки электродов;

$\theta_{pcj}, \theta_{rocj}$ – температуры обрабатываемой среды (воды) и отложений обрабатываемой среды на j -й секции, n – m расчетном (предыдущем) шаге, °С.

В блоке 8 блок-схемы алгоритма (рис. 2) проводится расчет электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, а в блоках 13 и 17 – с отложениями обрабатываемой среды на электродах. Реализация этих расчетов показана на рисунке 3. При этом для проведения расчета электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, в блоке 6 блок-схемы алгоритма (рис. 3) расчет сопротивлений обрабатываемой среды R_{cj} , напряжений на секциях U_{cj} (равных напряжению на соответствующей зоне нагрева $U_{cj} = U_{zk}$) и температур в межэлектродном пространстве θ_{cj} проводится по блок-схеме алгоритма (рис. 4а), а с отложениями – расчет сопротивлений R_{cj} и R_{rocj} , напряжений U_{cj} и U_{rocj} и температур θ_{cj} и θ_{rocj} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭЭН-Д проводится по блок-схеме алгоритма (рис. 4б).

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма (рис. 3) приняты следующие обозначения:

$\theta_{cj}, \theta_{rocj}$ – температуры обрабатываемой среды (воды) и отложений обрабатываемой среды на j -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

FPR – переменная, определяющая окончание итерационного расчета температуры обрабатываемой среды при достижении требуемой точности ε_θ ;

PR – переменная точности расчета на каждой секции ЭЭН-Д;

$\theta_{c\text{KZ}[N]}$ – температура на последней расчетной секции N -й зоны ЭЭН-Д, °С.

При этом сопротивления зон ЭЭН-Д (рис. 3, блок 1) определяются сопротивлением параллельно соединенных секций R_{cj} и рассчитываются по формуле:

$$R_{zk} = \int_0^{L_k} \frac{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}{h \cdot \Pi} dx. \quad (16)$$

При работе ЭЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах в блоке 1 блок-схемы алгоритма (рис. 3) проводится расчет сопротивлений зон нагрева R_{zk} , тока нагревателя I и напряжений зон U_{zk} по формулам (12), (3), (4) и системы (6). В блоке 14 блок-схемы алгоритма (рис. 3) приводится расчет напряжения разбаланса мостовой измерительной схемы ΔU по формуле (12). В блоках 8 и 9 блок-схемы алгоритма (рис. 4б) приводится расчет температур θ_c и θ_{oc} и по выражениям (10) и (5).

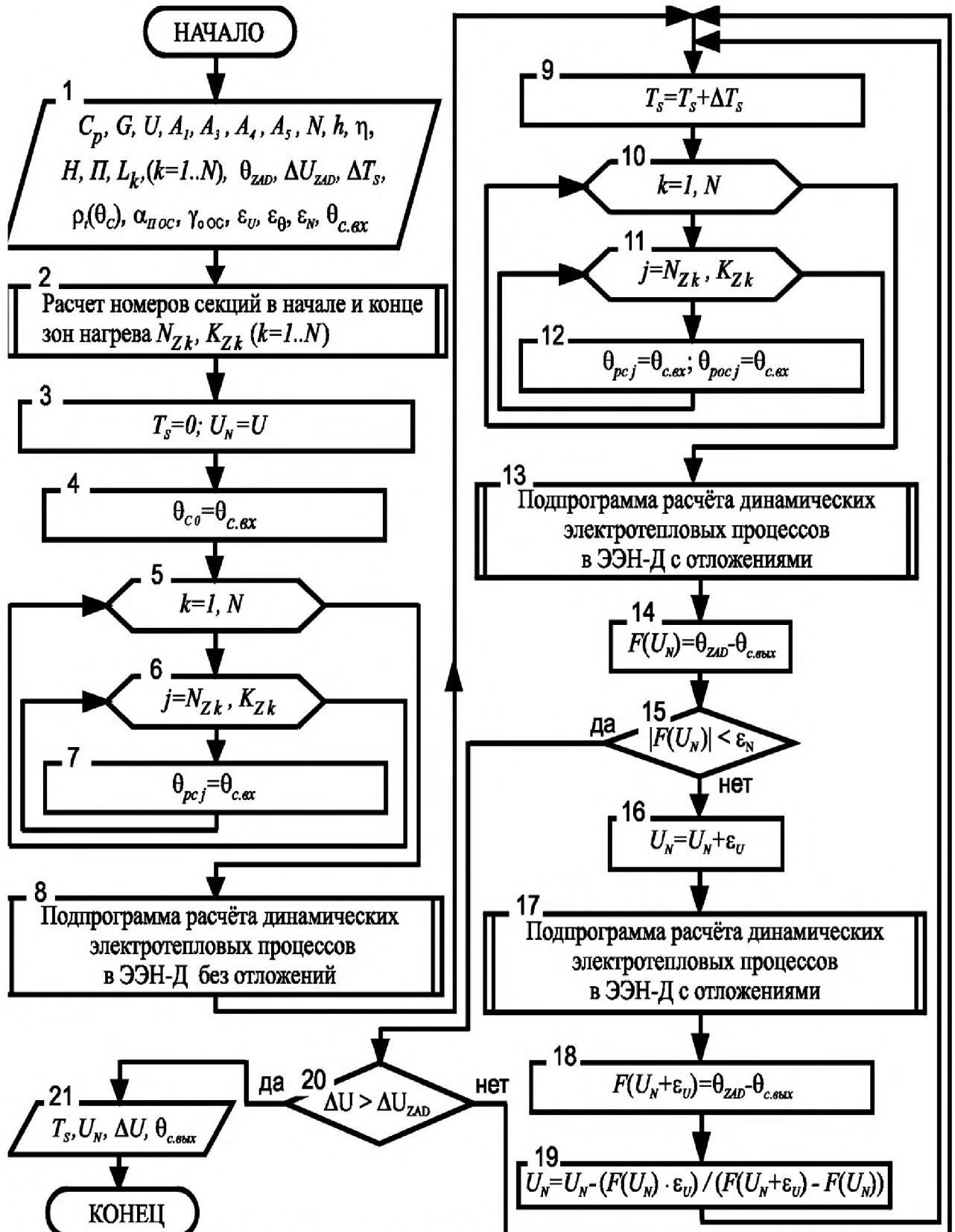


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета времени наработки T_s до отключения ЭЭН-Д для очистки электродов от отложений

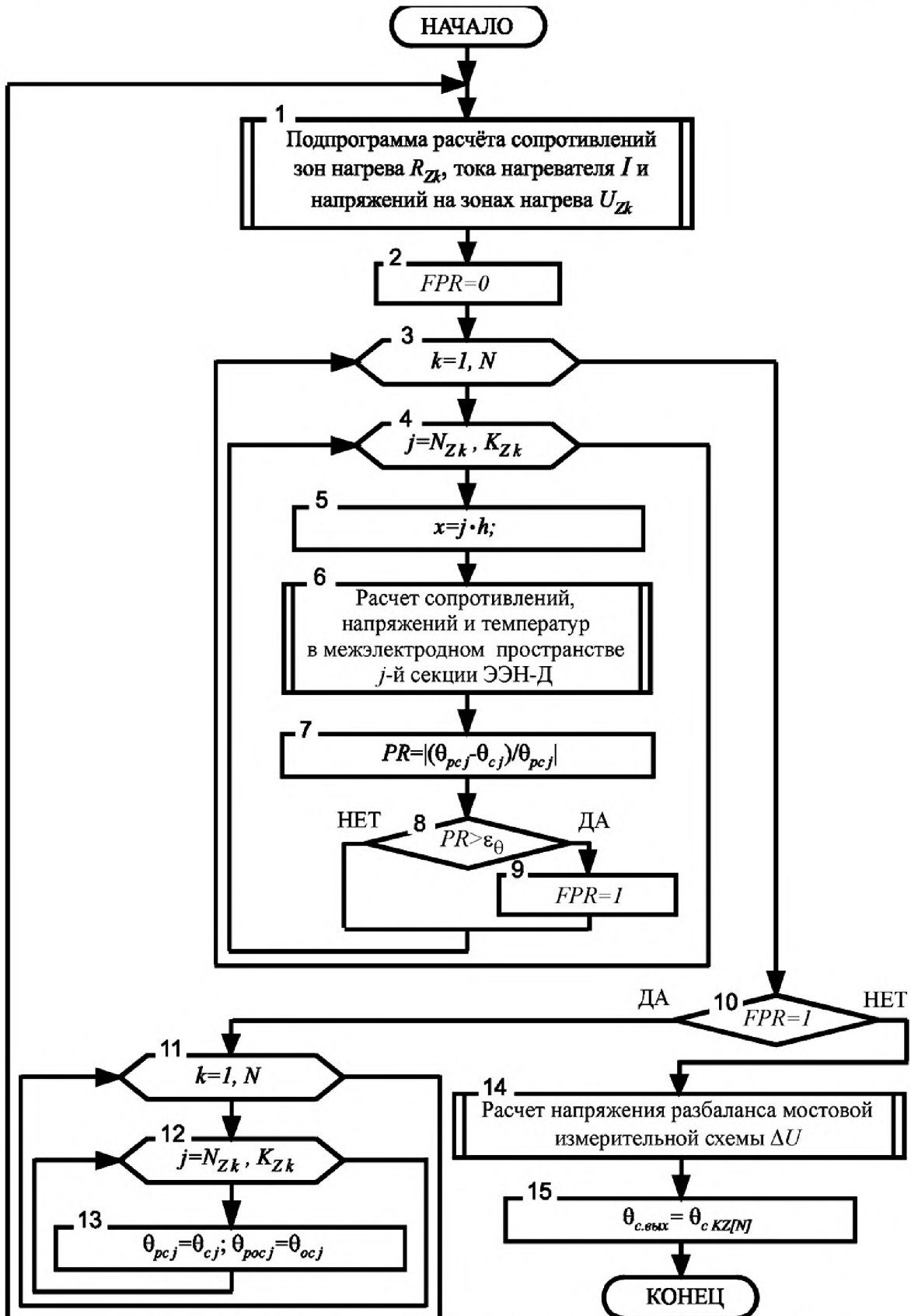


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма расчета температуры $\theta_{с.вых}$ на выходе ЭЭН-Д при его работе с отложениями обрабатываемой среды на электродах

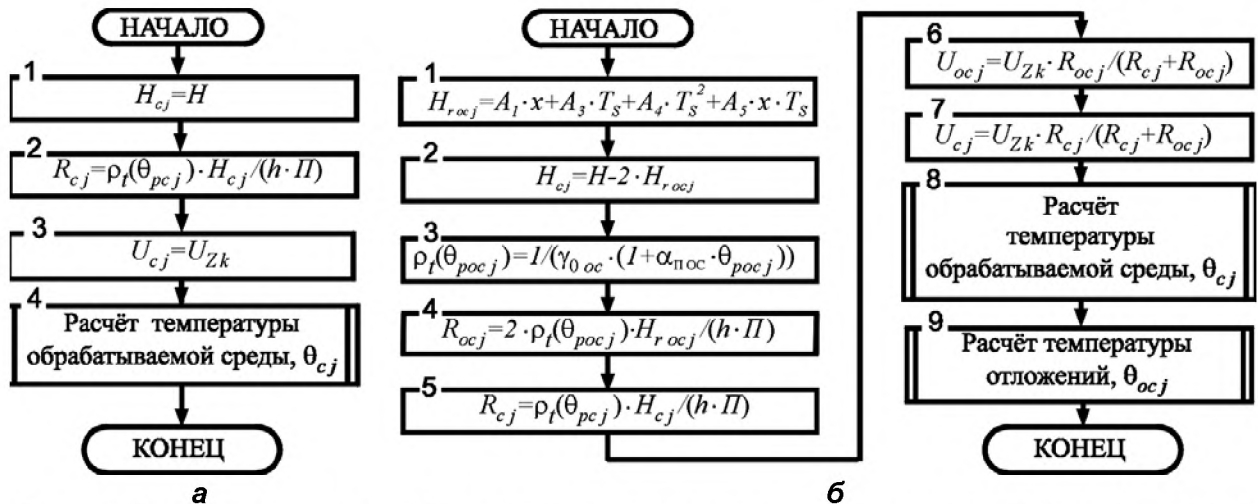


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма подпрограммы расчета сопротивлений $R_{c,j}$, напряжений $U_{c,j}$ и температур $\theta_{c,j}$ в обрабатываемой среде j -й секции ЭЭН-Д: при работе ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах (а) и сопротивлений $R_{c,j}$ и $R_{oc,j}$, напряжений $U_{c,j}$ и $U_{oc,j}$ и температур $\theta_{c,j}$ и $\theta_{oc,j}$ в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭЭН-Д, при работе ЭЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах (б)

Графики экспериментальных и расчетных значений ИС во времени $\Delta U = f(\tau)$, при образовании отложений обрабатываемой среды на электродах, в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д, характеризуемого следующими параметрами: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{\theta c} = 0,02149$ Ом·м; $\alpha_{\theta c} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{\theta oc} = 0,02386$ Ом·м; $\theta_{c \text{ вых}} = 70$ °C; $\alpha_{\theta oc} = 0,01069$ 10/°C; $G = 0,003$ кг/с; $\theta_{c \text{ вх}} = 20$ °C; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $\eta = 0,95$ приведены на рис. 5.

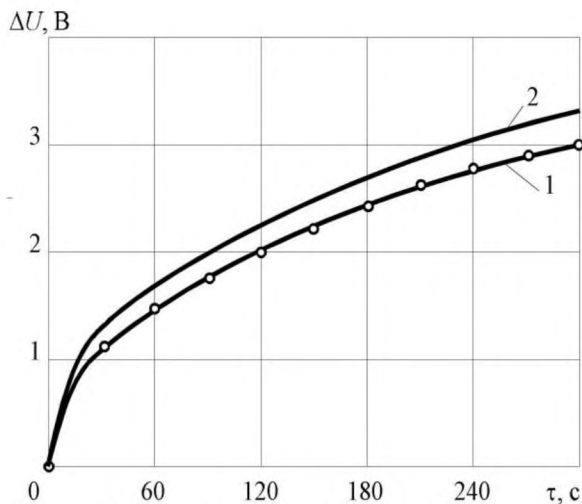


Рисунок 5. Экспериментальный (1) и расчетный (2) графики изменения ИС $\Delta U = f(\tau)$ (ΔU_s и ΔU_p) в измерительной диагонали моста во времени, при $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{\theta c} = 0,02149$ Ом·м; $\alpha_{\theta c} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{\theta oc} = 0,02386$ Ом·м; $\alpha_{\theta oc} = 0,01069$ 1/°C; $\rho_c = 1000$ кг/м³; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $G = 0,003$ кг/с; $\theta_{c \text{ вх}} = 20$ °C; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$; $R_{m1} + R_{m2} = 6700$ Ом; $R_p = 10000$ Ом

Таким образом, контролируя сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы, можно определять количество отложений на электродах. При относительно небольшом количестве отложений, их влияние на уменьшение мощности ЭЭН-Д можно компенсировать путем изменения напряжения питания ЭЭН-Д. Корректировка напряжения питания проводится по температуре на выходе из последней зоны нагрева (на последней секции) ЭЭН-Д таким образом, чтобы питающее напряжение обеспечивало необходимую мощность нагрева и температуру на выходе ЭЭН-Д. Очистку электродов ЭЭН-Д от отложений обрабатываемой среды необходимо проводить в то время, когда толщина отложений на электродах достигнет определенной величины, не влияющей на качество обрабатываемой среды и не нарушающей режим обработки.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что предложенная математическая модель с достаточной точностью (расчетная погрешность по сигналу $\Delta U = f(\tau)$ в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д – 12,76%) описывает электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН-Д во времени, при образовании отложений обрабатываемой среды на электродах. Некоторое расхождение экспериментальных и расчетных значений объясняется погрешностью измерения толщины отложений обрабатываемой среды на электродах, изменением коэффициента теплоотдачи, а также парообразованием при повышении температуры воды. Результаты моделирования показывают возможность работы ЭЭН-Д с соблюдением технологических требований к режиму электротепловой обработки, при наличии допустимого количества отложений обрабатываемой среды на электродах, а также возможность контроля процесса образования отложений обрабатываемой среды и своевременного отклю-

чения электронагревательной установки (ЭНУ) с ЭЭН-Д для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды. При этом величина напряжения разбаланса моста ЭЭН-Д в 3,0 В позволяет использовать более простые системы контроля и регулирования, что снижает их стоимость и повышает информативность системы управления и надежность работы ЭНУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов, А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей / А.М. Маслов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1980. – 208 с.

2. Васильева, Л.В. Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 03.02.08 / Л.В. Васильева. – Краснодар, 2017. – 24 с.

3. Карницкий, Н.Б. Теплофизические свойства и структура отложений на поверхностях нагрева энергетического оборудования / Н.Б. Карницкий, А.В. Нерезько, В.А. Чиж // Известия ВУЗов и энергетических объединений стран СНГ. Энергетика: международ. науч.-технич. и производственный журнал. – 2007. – № 1. – С. 55-60.

4. Sohail, M.A. Concentration control of silica in water chemical regime for natural circulation high pressure drum boiler unit of thermal power station / M.A. Sohail, A.I. Mustafa // Indian Journal of Chemical Technology. – 2007. – № 14. – P. 195-199.

5. Зимняков, А.М. Анализ химических отложений теплового оборудования и способы их очистки / А.М. Зимняков, Р.В. Наумов // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – 2010. – Т. 21. – № 17. – С. 104-108.

6. Experimental investigation of CaSO₄ crystallization on a flat plate / M.G. Mwaba [et al.] // Heat Transfer Eng. – 2006. – V. 27. – № 3. – P. 42-54.

7. Балабан-Ирменин, Ю.В. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения (обзор) / Ю.В. Балабан-Ирменин [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – Т. 30. – № 3. – С. 10-16.

8. Bahadori, A. Prediction of silica carry-over and solubility in steam of boilers using simple correlation / A. Bahadori, H.B. Vuthaluru // Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30. – P. 250-253.

9. Прищепов, М.А. Моделирование образования отложений на электродах проточных многозонных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-технич. конференции / Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – Минск, 2022. – С. 228-231.

10. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.

11. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М.А. Прищепов. – Минск: БАТУ, 1999. – 295 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 09.10.2023

Система микропроцессорного автоматизированного регулирования положения распределительной штанги относительно обрабатываемой поверхности

Предназначена для повышения равномерности внесения рабочего раствора пестицидов штанговыми опрыскивателями, снижения времени на подготовку агрегата к работе и его регулировки в процессе работы.

Система обеспечивает соблюдение постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью в процессе работы опрыскивателя, как на склонах, так и на равнинной местности.



Основные технические данные

Тип механизма изменения угла наклона штанги	Гидравлический
Тип системы	Микропроцессорная
Тип датчиков	Ультразвуковые
Диапазон измерения, м	0,4 – 2,0
Погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом, м	0,040
Время готовности системы к работе, мин.	до 1
Напряжение питающей сети, В	=12 ± 2,5
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	2
Масса, кг, не более	40