

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ 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 сравнительное исследование конструктивных параметров и характеристик электродных электронагревателей с плоскопараллельными, секционированными и зонированными электродными системами. Отмечена практическая значимость секционирования электродных систем для существенного снижения материалоемкости и тепловой инерционности электродных электронагревателей, а зонирования – для применения в электронагревательных установках при термообработке вязких термолabileльных сред. Обоснована возможность электродных электронагревателей-датчиков обеспечить контроль температуры обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве и защиту электронагревательных установок от аварийных режимов работы.*

*Ключевые слова: материалоемкость, тепловая инерционность, электродный электронагреватель, электродный электронагреватель-датчик, математическая модель, информационный сигнал, аварийный режим работы.*

*The paper presents a comparative study of design parameters and characteristics of electrode electric heaters with plane-parallel, sectionalized and zoned electrode systems. It is noted about the practical significance of sectionalization of electrode systems for essential reduction of material intensity and heat retention of electrode electric heaters, and zoning – for application in electric heating installations for heat treatment of viscous thermolabile media. The possibility of electrode electric heaters-sensors to provide temperature control of the processed medium in the interelectrode space and protection of electric heating installations from emergency operation modes is substantiated.*

*Key words: material intensity, heat retention, electrode electric heater, electrode electric heater-sensor, mathematical model, information signal, emergency operation mode.*

### Введение

Получение тепловой энергии в Республике Беларусь до 2020 года осуществлялось преимущественно путем сжигания различных видов твердого, жидкого и газообразного органического топлива. В связи с вводом в эксплуатацию БелАЭС существенно повысилась использование электрической энергии для тепловых нужд в народном хозяйстве страны. Министр энергетики Республики Беларусь В.М. Каранкевич в своем докладе 20.12.2023 отметил: «Это позволило за период 2021-2023 гг. заместить 5,8 млрд м<sup>3</sup> импортруемого природного газа» [1]. Использование электроэнергии для тепловых нужд будет возрастать и далее в связи с развитием атомной энергетики, что вызывает необходимость совершенствования технических средств электронагрева.

В сельскохозяйственном производстве тепловая энергия применяется достаточно широко. В работах профессоров Кудрявцева И.Ф., Карасенко В.А.,

Герасимовича Л.С. и других указано, что большинство тепловых процессов низкотемпературные и требуют ограничений, как по температуре нагреваемой среды, так и по температуре на контактной поверхности теплообмена [2; 4]. Для данных процессов целесообразно использование объемного ввода энергии, т.е. электродного нагрева.

Птицына Е.В., Кувалдин А.Б. и другие ученые в своих публикациях отмечают, что при использовании электродных электронагревателей (ЭЭН), электронагревательные установки (ЭНУ) требуют значительно меньших затрат на обслуживание и незаменимы там, где необходима высокая культура производства, а также точность поддержания температуры и быстрое действие систем автоматического регулирования (САР) [4-5]. В связи с широким разнообразием конструкций ЭНУ с ЭЭН необходимо сравнение их технических характеристик.

Цель настоящей работы – провести сравнение электротепловых схем проточных ЭЭН с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами для нагрева текучих токопроводящих сред по материалоемкости, тепловой инерционности ЭЭН и возможности контроля температуры обрабатываемой среды в ЭНУ.

**Основная часть**

Конструктивно ЭНУ с проточными ЭЭН могут изготавливаться с различными вариантами электротепловых схем, каждый вариант реализации которых имеет свои особенности. Одинаковые значения плотности тока по ширине и заданные по длине электродов в той или иной степени обеспечивают электротепловые схемы проточного однозонного ЭЭН с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами (рис. 1). Расширение функциональных возможностей ЭЭН с зонированной электродной системой достигается при параллельном подключении к нему двух последовательно соединенных резисторов (постоянного и переменного)  $Rm_1, Rm_2$ . Эти резисторы вместе с ЭЭН, который можно схематично заменить двумя последовательно соединенными термозависимыми сопротивлениями  $Rm_3$  и  $Rm_4$ , отражающими сопротивление обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН между одним токоподводящим и промежуточным электродом, а также между вторым токоподводящим и тем же промежуточным электродом, образуют измерительный мост (рис. 1в). Информационный сигнал разбаланса измерительного моста  $\Delta U$  отражает изменение температуры обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве. Такой ЭЭН является электродным электронагревателем-датчиком (ЭЭН-Д).

Электротепловые процессы, происходящие в

проточных ЭЭН (ЭЭН-Д) с однозонной плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами, описываются дифференциальным уравнением [6-8]:

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

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

$\rho_c$  – плотность обрабатываемой среды, кг/м<sup>3</sup>;

$H_i$  – расстояние между электродами  $i$ -й секции ЭЭН (ЭЭН-Д) для расчета электротепловых процессов в однозонном ЭЭН –  $H_i=H$ , м;

$\Pi_i$  – ширина электродов  $i$ -й секции ЭЭН (ЭЭН-Д) для расчета электротепловых процессов в однозонном ЭЭН –  $\Pi_i=\Pi$ , м;

$\theta_c$  – температура обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН (ЭЭН-Д), °C;

$G$  – массовый расход обрабатываемой среды в ЭЭН (ЭЭН-Д), кг/с;

$U_k$  – напряжение питания на  $k$ -й зоне ЭЭН (ЭЭН-Д) для расчета электротепловых процессов в однозонном и секционированном ЭЭН –  $U_k=U$ , В;

$\eta$  – коэффициент полезного действия, о.е;

$\rho_t$  – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м.

Для описания электротепловых процессов в проточном ЭЭН-Д с зонированной электродной системой (рис. 1в) к дифференциальному уравнению (1), записанному для  $i$ -го участка (секции) любой  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, добавляется система уравнений, реализующая вычисление напряжения  $U_k$  на  $k$ -й зоне ЭЭН-Д и общее напряжение питания  $U$  [7, 8]:

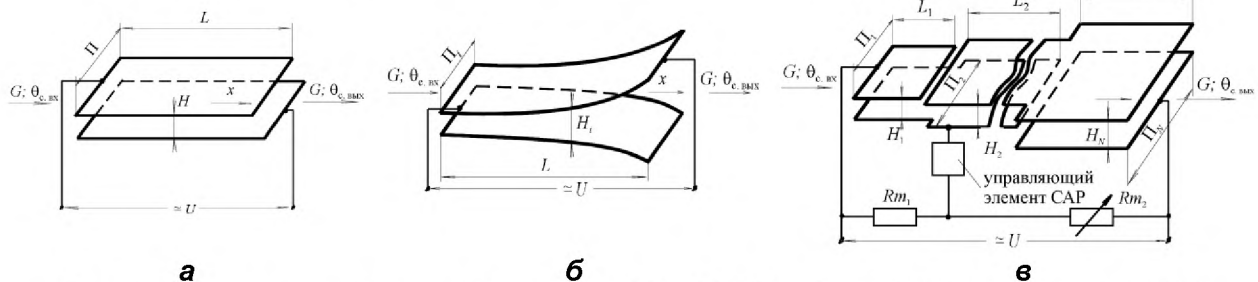


Рисунок 1. Электротепловые схемы проточных ЭЭН (ЭЭН-Д) с однозонной плоскопараллельной (а), секционированной (б) и многозонной (в) электродными системами:

САР – система автоматического регулирования;  $L$  – длина электродов проточного ЭЭН с плоскопараллельной и секционированной электродными системами, м;  $L_1, L_2, L_N$  – длина электродов ЭЭН-Д, м;  $N$  – количество зон ЭЭН-Д (количество зон на единицу меньше количества электродов ЭЭН-Д);  $\Pi, H$  – ширина электродов и расстояние между электродами в ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, м;  $\Pi_i, H_i$  – ширина электродов и расстояние между электродами секционированного ЭЭН, м;  $\Pi_1$  и  $H_1, \Pi_2$  и  $H_2, \Pi_N$  и  $H_N$  – ширина электродов и расстояние между электродами ЭЭН-Д, м;  $\theta_{с.вх}, \theta_{с.вых}$  – температура обрабатываемой среды на входе и на выходе ЭЭН, ЭЭН-Д, °C;  $Rm_1, Rm_2$  – термнезависимые сопротивления обрабатываемой среды измерительного моста ЭЭН-Д, Ом;  $G$  – массовый расход обрабатываемой среды в ЭЭН (ЭЭН-Д), кг/с;  $U$  – напряжение питания ЭЭН (ЭЭН-Д), В.

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

где  $I$  – мгновенное значение полного тока ЭЭН-Д, А;  
 $R_k$  – сопротивление  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, Ом;  
 $R$  – полное сопротивление ЭЭН-Д, Ом;  
 $\Pi_k, L_k, H_k$  – ширина, длина электродов и расстояние между электродами для  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, м;  
 $N$  – количество зон ЭЭН-Д (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН-Д).

Расчет величины информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы ЭЭН-Д  $\Delta U$  (рис. 1в) производится по формуле [4; 7]:

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

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

$Rm_3, Rm_4$  – термозависимые сопротивления межэлектродного пространства ЭЭН-Д с обрабатываемой средой, Ом;

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

$R = Rm_3 + Rm_4$  – термозависимое сопротивление межэлектродного пространства ЭЭН-Д с обрабатываемой средой, Ом.

В процессе нагрева обрабатываемой среды с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) ( $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ) ее удельное сопротивление снижается, а плотность тока в межэлектродном пространстве ЭЭН (ЭЭН-Д) при одном и том же межэлектродном расстоянии возрастает. Эти процессы оказывают существенное влияние на величину материалоемкости и тепловой инерционности ЭЭН с ЭЭН (ЭЭН-Д), поскольку проектирование ЭЭН проводится с учетом заданного распределения величины плотности тока в межэлектродном пространстве с обрабатываемой средой.

Проведено сравнение ЭЭН (ЭЭН-Д) с секционированной и зонированной электродной системой с однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой при значении массового расхода  $G = 0,002 \text{ кг/с}$ , удельной теплоемкости  $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ , плотности  $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$ , удельном сопротивлении  $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  обрабатываемой среды, напряжении питания  $U = 220 \text{ В}$ . Ширина электродов для всех исследуемых электродных систем составляла  $\Pi = 0,04 \text{ м}$ . В таблице 1 представлены

межэлектродные расстояния  $H$  на удалении  $X$  от начала секционированного ЭЭН. Межэлектродное расстояние  $H$ , длина электродов  $L_1$  ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой и длина электродов  $L_1, L_2, L_3$  ЭЭН-Д с зонированной электродной системой представлены в таблице 2.

**Таблица 1. Межэлектродные расстояния  $H$  на удалении  $X$  от начала секционированного ЭЭН**

| $X, \text{ м}$ | $H, \text{ м}$ |
|----------------|----------------|
| 0,001          | 0,0104         |
| 0,011          | 0,0107         |
| 0,021          | 0,0110         |
| 0,031          | 0,0115         |
| 0,041          | 0,0120         |
| 0,051          | 0,0127         |
| 0,061          | 0,0136         |
| 0,071          | 0,0147         |
| 0,081          | 0,0160         |
| 0,084          | 0,0163         |

**Таблица 2. Межэлектродное расстояние  $H$ , длина электродов  $L_1$  ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой и длина электродов  $L_1, L_2, L_3$  ЭЭН-Д с зонированной электродной системой**

| Количество зон ЭЭН (ЭЭН-Д) | $H, \text{ м}$ | $L_1, \text{ м}$ | $L_2, \text{ м}$ | $L_3, \text{ м}$ | $L_4, \text{ м}$ |
|----------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1                          | 0,0163         | 0,0163           |                  |                  |                  |
| 2                          | 0,0072         | 0,101            | 0,089            |                  |                  |
| 3                          | 0,0046         | 0,099            | 0,089            | 0,083            |                  |
| 4                          | 0,0034         | 0,100            | 0,090            | 0,085            | 0,080            |

Исследование работы ЭЭН (ЭЭН-Д) проводилось при нагреве воды на лабораторных установках от температуры на входе в нагреватель  $\theta_{c, \text{вх}} = 5^\circ\text{C}$  до температуры  $\theta_{c, \text{вых}} = 60^\circ\text{C}$  – на выходе. Электродные системы ЭЭН (ЭЭН-Д) и их характеристики рассчитывались на ЭВМ, с использованием численных методов расчета [6-8]. Расчетные данные сравнивались с результатами экспериментальных исследований. Относительное несовпадение температуры для однозонного ЭЭН с плоскопараллельной ЭС не превысило 7,23 %, для ЭЭН с секционированной ЭС – 6,11 % и для ЭЭН (ЭЭН-Д) с зонированной ЭС – 7,51 %. Относительное несовпадение ИС разбаланса мостовой измерительной схемы ЭЭН-Д не превысило 8,29 %.

Изменение материалоемкости  $\delta_{sc}$  ЭЭН (ЭЭН-Д) оценивали по процентному отношению площади электродных систем, соответственно, для секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного проточного ЭЭН (ЭЭН-Д) к площади  $S_{1 \text{ зн}}$  электродной системы проточного однозонного ЭЭН, рассчитывалось по выражению

$$\delta_{sc} = \frac{S_{1 \text{ зн}} - S_n}{S_{1 \text{ зн}}} 100\%, \quad (4)$$

где  $S_{и}$  – площадь электродов исследуемого ЭЭН (ЭЭН-Д) соответственно, с секционированной, двухзонной, трехзонной и четырехзонной электродной системой, м<sup>2</sup>.

Изменения величины площади электродов ( $S_{эс} = 2\pi \cdot L_k$ ) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН  $S_{и}$  по сравнению с величиной площади электродов проточного однозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой  $S_{1зн}$  представлены в таблице 3.

**Таблица 3. Результаты расчета изменения величины площади электродов  $S_{эс}$  (материалоемкости) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН  $S_{и}$  по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой  $S_{1зн}$**

| Вид проточного ЭЭН | Площадь электродов $S_{эс}$ М <sup>2</sup> | Изменение величины площади электродов $\delta_{эс}$ , % |
|--------------------|--|---|
| однозонный         | 0,008 88                                   | –   |
| секционированный   | 0,006 72                                   | –24,32  |
| двухзонный         | 0,015 20                                   | 71,17   |
| трехзонный         | 0,021 68                                   | 144,14  |
| четырёхзонный      | 0,028 40                                   | 219,82  |

Тепловую инерционность ЭЭН (ЭЭН-Д) оценивали по постоянной времени нагрева  $T$  (время, в течение которого значение температуры среды на выходе ЭЭН (ЭЭН-Д) достигнет 0,632 установившейся температуры среды). Снижение постоянной времени нагрева  $\delta_{Ti}$  (тепловой инерционности) проточных ЭЭН с секционированной и зонированной ЭС по отношению к проточному однозонному ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, рассчитывалось по уравнению:

$$\delta_{Ti} = \frac{T_{1зн} - T_{и}}{T_{1зн}} 100\%, \quad (5)$$

где  $T_{1зн}$  – постоянная времени нагрева однозонного проточного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, с;

$T_{и}$  – постоянная времени нагрева исследуемого проточного ЭЭН (ЭЭН-Д) соответственно, с секционированной, двухзонной, трехзонной и четырехзонной электродными системами, с.

Результаты расчета снижения постоянной времени нагрева проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН  $T_{и}$  по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой  $T_{1зн}$  представлены в таблице 4.

Информационный сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы получаем с одного из промежуточных электродов и общей точки последовательного соединения

постоянного и переменного резисторов. Измерительный мост балансировался при холодном состоянии обрабатываемой среды между электродами. Суммарное значение сопротивления резисторов  $Rm_1$  и  $Rm_2$  составляло 6700 Ом. Для измерения информационного сигнала разбаланса моста использовался измерительный прибор с внутренним сопротивлением  $R_{пр} = 10000$  Ом.

Повышение величины информационного сигнала, характеризующего температуру нагрева в проточных ЭЭН-Д с зонированными электродными системами, по сравнению с информационным сигналом, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСП), рассчитывалось по выражению:

$$\delta_{\Delta U_j} = \frac{\Delta U_j - \Delta U_{cp}}{\Delta U_{cp}} 100\%, \quad (6)$$

где  $\Delta U_j$  – величина информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы исследуемого проточного ЭЭН-Д на промежуточном электроде  $j$ ;

$j$  – номер промежуточного электрода от начала ЭЭН-Д (для двухзонного ЭЭН-Д –  $j = 1$ , для трехзонного индекс  $j$  принимает, соответственно, значения 1 и 2, для четырехзонного – 1, 2 и 3);

$\Delta U_{cp}$  – величина информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми датчиками температуры, В.

В исследовании проводилось сравнение с серийно выпускаемым датчиком температуры РТ-100(ТСП-100), подключенным к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP.

Результаты расчета изменения значения величины информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы  $\Delta U_j$ , который характеризует температуру нагрева обрабатываемой среды в двухзонном, трехзонном и четырехзонном ЭЭН-Д, по сравнению с информационным сигналом, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми датчиками температуры, представлены в таблице 5.

**Таблица 4. Снижение постоянной времени нагрева  $T$  проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН  $T_{и}$  по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой  $T_{1зн}$**

| Вид проточного ЭЭН | Тепловая инерционность $T$ , с | Изменение тепловой инерционности $\delta_{Ti}$ , % |
|--------------------|--------------------------------|--|
| однозонный         | 24,49                          | –  |
| секционированный   | 15,87                          | 35,20  |
| двухзонный         | 19,61                          | 19,93  |
| трехзонный         | 17,86                          | 27,07  |
| четырёхзонный      | 16,85                          | 31,20  |

**Таблица 5. Изменение величины информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы  $\Delta U_j$ , характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды, в двухзонных, трехзонных и четырехзонных проточных ЭЭН-Д по сравнению с ИС TSP-100**

| Название источника информационного сигнала, характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды | Номер промежуточного электрода $j$ | Величина информационного сигнала $\Delta U$ , В | Повышение величины информационного сигнала в сравнении с информационным сигналом TSP-100 $\delta_{\Delta U_j}$ , % |
|---|------------------------------------|---|--|
| датчик температуры PT-100 (TSP-100), подключенный к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP  | –                                  | 0,011   | –  |
| двухзонный проточный ЭЭН-Д с плоскопараллельной электродной системой                                  | 1                                  | 16,31   | 148 172,7  |
| трехзонный проточный ЭЭН-Д с плоскопараллельной электродной системой                                  | 1                                  | 15,23   | 138 354,5  |
|   | 2                                  | 15,15   | 137 627,3  |
| четырёхзонный проточный ЭЭН-Д с плоскопараллельной электродной системой                               | 1                                  | 12,99   | 117 990,9  |
|   | 2                                  | 16,92   | 153 718,2  |
|   | 3                                  | 13,01   | 118 172,7  |

Использование ЭЭН-Д не ограничивается контролем нагрева обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, он может выполнять и другие функции. Многофункциональные возможности ЭЭН-Д обусловлены тем, что на величину информационного сигнала разбаланса моста  $\Delta U$ , помимо температуры на выходе из ЭЭН-Д  $\theta_{с.вых}$ , оказывает влияние напряжение питания  $U$ , величина массового расхода обрабатываемой среды  $G$  и температура на входе в ЭЭН-Д  $\theta_{с.вх}$ . Изменение этих параметров влияет на мощность ЭЭН-Д и приводит к изменению температуры обрабатываемой среды на выходе нагревателя  $\theta_{с.вых}$ . Кроме того, номер промежуточного электрода подключения измерительного прибора и температурный коэффициент сопротивления обрабатываемой среды определяет соотношение термозависимых сопротивлений измерительного моста, что также оказывает влияние на величину информационного сигнала. Это позволяет использовать информационный сигнал разбаланса моста для контроля отклонений режимов технологического процесса от заданных и сигнализации возникновения аварийных режимов работы [9, 10].

Таким образом, используя результаты проведенных исследований характеристик ЭЭН и ЭЭН-Д, можно провести обоснование выбора их электро-тепловой схемы при проектировании ЭНУ.

#### Заключение

1. Практическое применение секционированных электродных систем ЭЭН в ЭНУ способствует существенному снижению их материалоемкости и тепловой инерционности. Однако их применение для тепловой обработки вязких термолабильных сред может приводить к образованию застойных зон обрабатываемой среды.

2. Обработку вязких термолабильных сред наиболее целесообразно проводить в ЭЭН-Д с зонированной электродной системой. При этом зонирование также обеспечивает контроль температуры обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве и защиту ЭНУ от аварийных и ненормальных режимов работы.

3. В ходе исследований конструктивных параметров и характеристик однозонного проточного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, секционированного ЭЭН и многозонного проточного ЭЭН-Д установлено, что секционирование электродных систем ЭЭН обеспечивает снижение материалоемкости на 24,32 % и тепловой инерционности на 35,20 % в сравнении с однозонным проточным ЭЭН. Использование зонирования электродных систем исключает образование застойных зон при разработке ЭНУ для нагрева вязких текучих сред и снижает инерционность многозонного проточного ЭЭН-Д на 19,93...31,20 %, но и одновременно приводит к увеличению материалоемкости на 71,17...219,82 % относительно проточного ЭЭН с однозонной плоскопараллельной электродной системой. Вместе с тем, многозонные проточные ЭЭН-Д позволяют получить информационный сигнал, отражающий температуру обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д, который более чем в 1000 раз превышает информационный сигнал серийно выпускаемых датчиков температуры.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пресс-центр министерства энергетики Республики Беларусь. Виктор Каранкевич принял участие в пресс-конференции ко Дню энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-prinyal-uchastie-v-press-konferentsii-kodnyu-energetika/>. – Дата доступа: 21.03.2024.

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

3. 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.

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

5. Птицына Е.В. Низковольтные электродные водоподогреватели с питанием током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158). С. 20-27.

6. 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. 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.

8. Прищепов, М.А. Разработка и исследование математических моделей статических и динамических характеристик проточных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2023. – № 6. – С. 26-31.

9. Прищепов, М.А. Моделирование работы многозонных электродных электронагревателей-датчиков при изменениях массового расхода обрабатываемой среды / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве : матер. I Национ. науч.-практич. конф. / ФГБОУ ВО Вавиловский ун-т – Саратов, 2023. – С. 287-294.

10. Прищепов, М.А. Функциональные возможности электродных электронагревателей с зонированными электродными системами / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 23-28.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.03.2024

### Вакуумная станция для доильных установок

*Предназначена* для создания вакуумметрического давления в системах машинного доения коров. Может применяться в отраслях промышленности, технологические процессы которых требуют создания вакуума.



#### Основные технические данные

|  |               |
|--|---------------|
| Станция вакуумная водокольцевая                      | ВВН-75        |
| Тип  | передвижная   |
| Быстрота действия при вакууме 50%, м <sup>3</sup> /ч | 75            |
| Предельное вакуумметрическое давление, кПа           | 90            |
| Потребляемая мощность, кВт                           | 3,9           |
| Расход рециркуляционной воды, литров в минуту        | 8             |
| Габаритные размеры, мм                               | 1500x600x1500 |
| Масса, кг, не более                                  | 35            |

Применение установки обеспечивает снижение энергоемкости процесса доения коров до 0,052 кВт/ч/м<sup>3</sup> при стабильном вакуумном режиме.