

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права  
УДК 621.365.683.9

**РУТКОВСКИЙ**  
**Иосиф Геннадьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ  
ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ТЕКУЧИХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ  
СРЕД ПРИМЕНЕНИЕМ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ  
И ЗОНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве (технические науки)

Минск, 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Научный руководитель – **ПРИЦЕПОВ Михаил Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Официальные оппоненты: **КОРОТКЕВИЧ Михаил Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета

**АЛЕКСАНДРОВ Олег Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация – Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 26 сентября 2024 г. в 14<sup>30</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций К 05.31.01 при учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (БГАТУ) по адресу: 220012, Минск, пр. Независимости, 99, корп.1, ауд. 317.

Почтовый адрес: пр. Независимости, 99, корп.1, Минск, 220012.  
Телефон ученого секретаря (+375-17) 373-11-53, адрес электронной почты: [ankrutau@yandex.by](mailto:ankrutau@yandex.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГАТУ.  
Автореферат разослан «    » августа 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



А.В. Кругов

## **ВВЕДЕНИЕ**

Получение тепловой энергии для отопления и производственных технологических процессов осуществляется в основном путем сжигания органического топлива или преобразования электрической энергии в тепловую. В связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС доля использования электрической энергии для тепловых нужд, с целью замещения импортируемого углеводородного топлива, будет возрастать. Применение в энергосистеме Республики Беларусь двухставочных дифференцированных тарифов на электрическую энергию будет дополнительно стимулировать этот рост.

Широко применяемые электронагревательные установки (ЭНУ) с теплогенерирующими элементами в виде ТЭНов отличаются высокой температурой нагревательного элемента (650 °С; ГОСТ 13268–88), что вызывает необходимость применения дополнительных промежуточных теплоносителей, поскольку температура нагрева большинства сельскохозяйственных сред, в том числе продуктов питания и кормов, ограничена и не превышает, как правило, 150 °С. Применение промежуточных теплоносителей приводит к увеличению стоимости ЭНУ и снижению их энергоэффективности. ЭНУ с электродными электронагревателями (ЭЭН) обеспечивают объемный ввод тепловой энергии при невысокой температуре нагрева среды, однако имеют ограничения по распределению допустимой плотности тока в среде межэлектродного пространства, что вызывает необходимость разработки более совершенных ЭЭН.

Разработка и использование ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами обеспечивает снижение материалоемкости, тепловой инерционности и заданное распределение плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства, а также измерение температуры обрабатываемой среды и количества отложений на электродах, что является актуальной задачей, так как ее решение значительно повышает качество тепловой обработки термолabileльных сред и расширяет области использования электротепловых процессов.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Работа выполнялась в соответствии с приоритетными направлениями научно-технической деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденными Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156 (4.5. Агропромышленные и производственные технологии: производство, хранение и переработка сельскохозяйственной продукции),

и в соответствии с госбюджетной тематикой научных исследований кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» в рамках задания перспективного плана научно-исследовательских работ учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» на 2021–2025 годы по теме 4.12. «Совершенствование электродных электронагревателей текучих термолабильных сред применением секционированных и зонированных электродных систем».

### **Цель и задачи исследований**

**Цель работы** – совершенствование конструкции ЭЭН текучих термолабильных сред, а также расширение их функциональных возможностей и областей рационального использования.

Для достижения указанной цели потребовалось решить **следующие задачи**:

- провести анализ основных тепловых процессов в сельскохозяйственном производстве (СХП) и определить перспективные области рационального использования ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами;

- разработать математические модели (ММ) и исследовать характеристики основных электротепловых схем секционированных и зонированных ЭЭН;

- разработать методику и исследовать электрофизические характеристики сельскохозяйственных (с.-х.) термолабильных сред для обоснования конструктивных и допустимых технологических параметров ЭЭН;

- разработать инженерные методики расчета и оптимизации конструктивных и технологических параметров ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами;

- обосновать возможные области многофункционального использования многозонных электродных электронагревателей-датчиков (ЭЭН-Д) в ЭНУ;

- разработать методику математического моделирования информационного сигнала (ИС) многозонных ЭЭН-Д при наличии отложений на электродах.

**Объект исследования:** технологии и технические средства прямого электродного электронагрева текучих термолабильных сред.

**Предмет исследования:** экспериментальные и математические методы обоснования конструктивно-технологических параметров ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами для прямого электродного электронагрева текучих термолабильных сред.

**Методы исследований:** при решении поставленных задач использовались комплексные теоретические и экспериментальные методы исследований; решение задач проводилось методами аналитического и численного математического моделирования, теоретического анализа, вычислительного и натурального эксперимента.

### **Научная новизна**

Научная новизна и значимость научных результатов заключаются в следующем:

- определены перспективные области рационального использования и сущность проблемы электродного электронагрева в технологических процессах СХП;

- разработаны ММ и алгоритмы исследований статических и динамических характеристик основных электротепловых схем (ЭТС) ЭЭН (ЭЭН-Д) с секционированными и зонированными электродными системами;

- разработана методика исследования электрофизических характеристик с.-х. термолабильных сред для обоснования конструктивных и допустимых технологических параметров ЭЭН;

- разработаны инженерные методики расчета и оптимизации конструктивных параметров ЭЭН (ЭЭН-Д) с секционированными и зонированными электродными системами;

- обоснованы возможные области многофункционального использования многозонных электродных ЭЭН-Д в ЭНУ, разработана методика математического моделирования их ИС при наличии отложений на электродах.

Техническая новизна разработок подтверждена 7 патентами Республики Беларусь на изобретения.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Основные ЭТС ЭЭН и ЭЭН-Д для нагрева текучих термолабильных сред с секционированными и зонированными электродными системами, обеспечивающими допустимые плотности тока в межэлектродном пространстве нагревателей и, соответственно, заданную интенсивность нагрева сред.

2. ММ и алгоритмы исследования статических и динамических характеристик основных ЭТС проточных и непроточных ЭЭН и ЭЭН-Д с секционированными и зонированными электродными системами.

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований статических и динамических характеристик основных ЭТС ЭЭН и ЭЭН-Д, раскрывающие влияние на них конструктивных и технологических параметров ЭЭН.

4. Разработанная методика исследования электрофизических характеристик с.-х. термолабильных сред.

5. Методики и алгоритмы расчета и оптимизации конструктивных и технологических параметров основных ЭТС ЭЭН и ЭЭН-Д с секционированными и зонированными электродными системами.

6. Методика и алгоритм математического моделирования ИС проточных многозонных ЭЭН-Д при наличии отложений на их электродах.

### **Личный вклад соискателя**

Во всех авторских работах, а также написанных в соавторстве, соискатель принимал самое непосредственное участие в разработке ММ, алгоритмов и программ их исследования, методик расчета и экспериментального

исследования характеристик ЭЭН (ЭЭН-Д), а также разработке их экспериментальных образцов, проведении и обработке экспериментов. Постановка цели и задач исследований, анализ и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем, доктором технических наук, профессором Прищеповым М.А., который также оказывал научную и практическую помощь, консультировал на всех этапах выполнения диссертационной работы.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях (НТК): аспирантов и докторантов БАТУ (Минск, БАТУ, 1995 г.), на 2-й республиканской НТК «Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин» (Минск, БАТУ, 1996 г.), на 2-й НТК «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (Гродно, 1996 г.), а также на следующих Международных научно-технических конференциях (МНТК): «Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК» (Минск, 1997 г.), «Моделирование и прогнозирование аграрных энергоресурсо-сберегающих процессов и технологий» (Минск, 1998 г.), 3-й МНТК «Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин» (Минск, 2002 г.), «Перспективы и направления развития энергетики АПК» (Минск, 2006 г.), «Перспективы и направления развития энергетики АПК» (Минск, 2007 г.), «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения» (Санкт-Петербург, 2009 г.), «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, 2009 г.), «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (Минск, 2013 г.), «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, 2019 г.), «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 2020 г.), «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, 2022 г.), I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г.П.Ерошенко (Саратов, 2023 г.), III Международной научно-практической конференции «Промышленная политика, энергетика и цифровизация: теория и практика трансформации» (Волгоград, 2023 г.).

### **Опубликованность результатов**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 43 печатных работах. Из них: 11 статей – в журналах из перечня научных изданий ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, одна статья – в зарубежном рецензируемом журнале (РФ), 3 статьи – в сборниках научных трудов, 12 работ – в сборниках материалов МНТК, одна работа – в сборнике материалов международной научно-практической конференции, одна работа – в сборнике материалов национальной научно-практической конференции с международным участием, 5 работ – в сборниках материалов НТК; получены 7 патентов Республики Беларусь на изобретения и 2 свидетельства о регистрации

компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь. Без соавторов опубликованы 5 печатных работ: одна статья – в зарубежном рецензируемом журнале (РФ) и 4 работы – по материалам МНТК.

Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 13,1 авторских печатных листа, с учетом долевого участия – 6,2.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя термины и определения, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из пяти глав, заключение, список использованных источников и 12 приложений. Список использованных источников включает 165 наименований: библиографический список из 123 наименований, в том числе 7 на иностранном языке, и список публикаций соискателя ученой степени, состоящий из 42 наименований. Общий объем диссертационной работы с приложениями составляет 307 страниц и содержит 30 таблиц и 59 рисунков. Приложения и библиографический список занимают 120 страниц, основная часть диссертации включает 172 страницы.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ основных низкотемпературных технологических процессов СХП, который показал, что во многих технологических процессах возможно использование ЭНУ с объемным вводом энергии в обрабатываемую среду, т. е. ЭНУ с ЭЭН (ЭЭН-Д). Применение же в ЭНУ традиционной элементной базы на основе протяженных металлических электронагревателей (ЭН) вызывает техническое противоречие между низкой температурой нагрева обрабатываемой среды и высокой температурой теплогенерирующих элементов, что приводит к необходимости применения промежуточных теплоносителей и снижению энергоэффективности ЭНУ. При этом используемые для тепловой обработки сред ЭЭН (ЭЭН-Д) должны обеспечивать равномерный нагрев в поперечном сечении межэлектродного пространства по ходу движения обрабатываемой среды, при значениях плотности тока, не превышающих допустимые, надежный электрический контакт токоподводящих электродов с обрабатываемой средой, а также возможность периодической очистки электродов. Согласно приведенной в главе на рисунке 1 классификации ЭЭН по основным признакам этим требованиям отвечают ЭЭН с секционированными, зонированными или комбинированными плоскими электродными системами. Кроме этого из-за быстротечности тепловых процессов в проточных ЭНУ необходимо использовать малоинерционные датчики температуры или ЭЭН-Д, в которых в качестве термочувствительного элемента используется термозависимое сопротивление нагреваемой среды, измеряемое методом нулевого или дифференциального сравнения с использованием мостовой измерительной схемы.

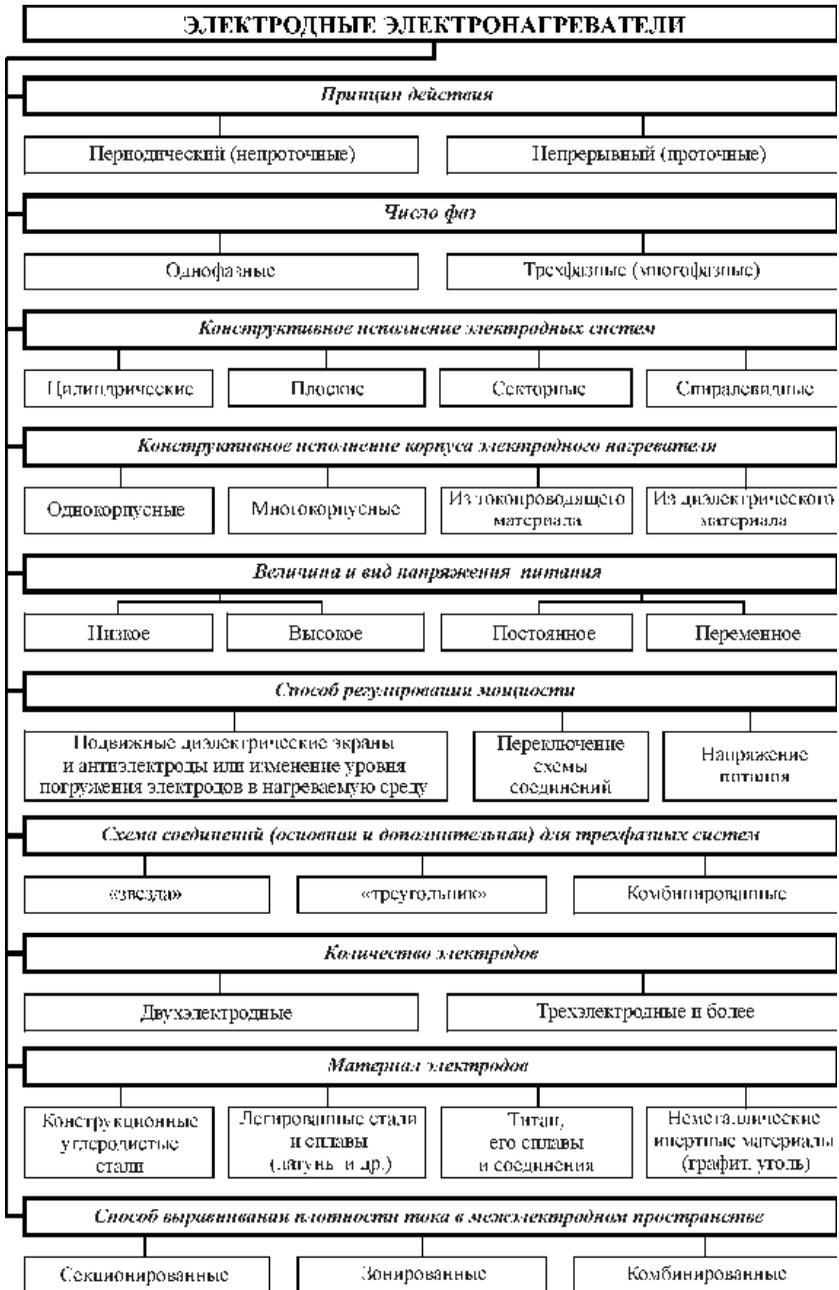


Рисунок 1 – Классификация ЭЭН по основным признакам

Во второй главе диссертации рассмотрены основные ЭТС проточных ЭЭН (ЭЭН-Д) (рисунок 2) и разработаны ММ, алгоритмы и программы исследования на ЭВМ их статических и динамических характеристик.

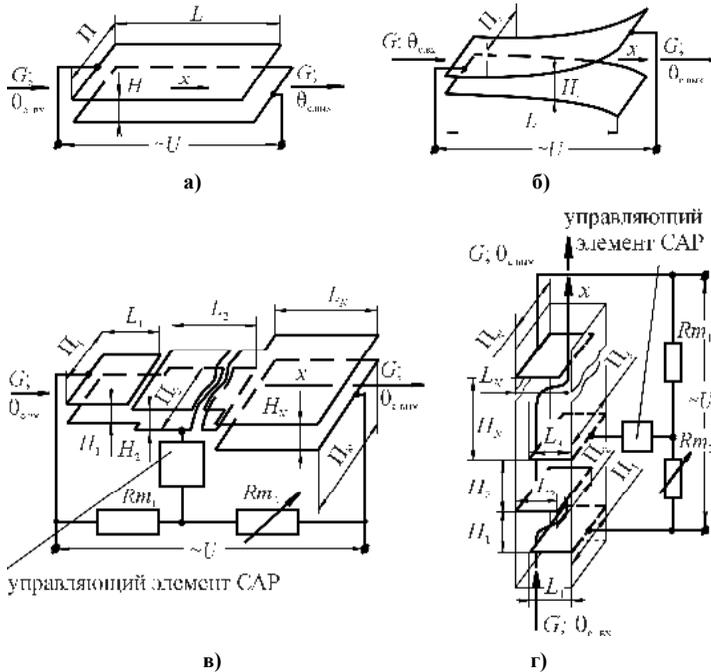


Рисунок 2 – ЭТС проточных ЭЭН (ЭЭН-Д) с плоскопараллельной (а), секционированной (б) и зонированными (в, г) электродными системами

Электротепловые процессы (ЭТП), происходящие в ЭЭН с плоскопараллельными и секционированными электродными системами, описываются дифференциальным уравнением

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

где  $C_p$  – удельная теплоемкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·°С);  $\rho_c$  – плотность обрабатываемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $H_i$  – межэлектродное расстояние на  $i$ -й секции ЭЭН, м;  $\Pi_i$  – ширина электродов на  $i$ -й секции ЭЭН, м;  $\theta_c$  – температура обрабатываемой среды, °С;  $\tau$  – переменная по времени нагрева, с;  $G$  – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;  $x$  – текущая координата длины ЭЭН, м;  $U$  – напряжение питания, В;  $\eta$  – коэффициент полезного действия, о.е.;  $\rho_i$  – удельное сопротивление

обрабатываемой среды, Ом·м (для плоскопараллельной электродной системы  $H_i = H$ ,  $\Pi_i = \Pi$ ).

Использование ЭЭН с секционированными электродными системами позволяет приблизить распределение плотности тока по длине нагревателя к допустимому за счет изменения сечения межэлектродного пространства, что значительно уменьшит материалоемкость ЭЭН, но может привести к возникновению застойных зон при компоновке ЭНУ для нагрева вязких текучих сред. Для исключения застойных зон в ЭНУ могут использоваться многозонные проточные ЭЭН (ЭЭН-Д) с плоскопараллельными электродными системами (рисунок 2 в), которые обеспечивают получение ИС  $\Delta U$  о температуре обрабатываемой среды, используемой системой автоматического регулирования (САР). ЭТП, происходящие в таких ЭЭН-Д, описываются следующей системой дифференциально-интегральных уравнений:

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

где  $U_k$  – напряжение на  $k$ -й последовательно соединенной зоне ЭЭН-Д, В;  $N$  – количество последовательно соединенных зон ЭЭН-Д;  $I$  – мгновенное значение полного тока ЭЭН-Д, А;  $R_k$  – мгновенное значение сопротивления  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, Ом;  $R$  – мгновенное значение полного сопротивления ЭЭН-Д, Ом;  $L_k$  – длина  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, м.

Величина ИС  $\Delta U$  в измерительной диагонали мостовой измерительной схемы определяется по следующей формуле:

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

где  $R_{pr}$  – внутреннее сопротивление измерительного прибора, Ом;  $Rm_1$ ,  $Rm_2$  – постоянное и переменное 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 термoneзависимых сопротивлений мостовой измерительной схемы, Ом.

Широкое применение непроточные ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (рисунок 3) нашли в ЭНУ периодического действия при нагреве воды и производстве пара, а также при нагреве продуктов питания и запарке кормов.

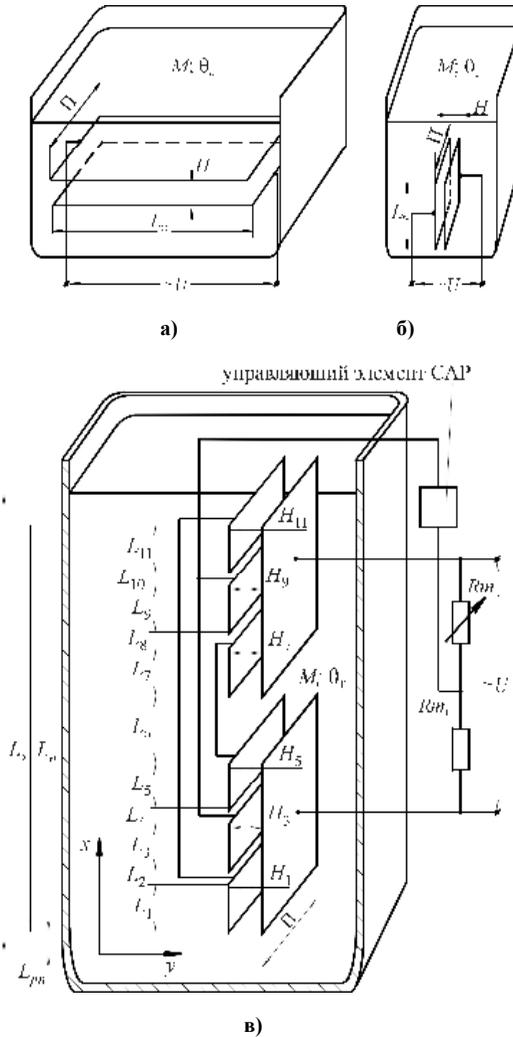


Рисунок 3 – ЭТС непроточных ЭЭН (ЭЭН-Д) с горизонтальной (а), вертикальной (б) и зонированной (в) плоскопараллельными электродными системами

В непроточных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (рисунок 3) электроды могут располагаться как горизонтально, так и вертикально. При вертикальном расположении электродов в ЭЭН может использоваться зонирование, так как в межэлектродном пространстве происходит движение обрабатываемой среды за счет естественной конвекции. Несмотря на указанные различия, общим в этих ЭТС будет следующее: температура обрабатываемой среды в процессе нагрева изменяется во времени, и если ее принять одинаковой во всей емкости, то происходящие ЭТП в ЭЭН с горизонтальной и вертикальной плоскопараллельной электродными системами описываются дифференциальным уравнением

$$C_p \cdot M \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot L_3}{\rho_t(\theta_c) \cdot H} - k \cdot F(\theta_c - \theta_{вс}), \quad (4)$$

где  $M$  – масса обрабатываемой среды, кг;  $L_3$  – длина (высота) электродов ЭЭН-Д, м;  $k$  – коэффициент теплоотдачи ЭНУ в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F$  – площадь поверхности теплоотдачи ЭНУ, м<sup>2</sup>;  $\theta_{вс}$  – температура окружающей среды, °С.

Выразив напряжение  $U$  через напряженность  $E$  в межэлектродном пространстве и удельное сопротивление среды  $\rho_t(\theta_c)$  – через ее удельную проводимость, т. е.  $\rho_t(\theta_c) = 1 / (\gamma_0(1 + \alpha_n(\theta_c)))$ , где  $\gamma_0$  – электрическая проводимость среды при 0 °С (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $\alpha_n$  – температурный коэффициент ее проводимости °С<sup>-1</sup>, получим электротепловые характеристики непроточных ЭЭН при различных соотношениях теплотеря ЭНУ ( $k \cdot F$ ) и интенсивности изменения тепловыделения в обрабатываемой среде за счет  $\alpha_n$  ( $E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3$ ), приведенные в таблице 1, где  $\theta_y$  – установившаяся температура, °С;  $T$  – постоянная времени нагрева при  $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$ , с;  $\theta_{сн}$  – начальная температура обрабатываемой среды, °С;  $T'$  – постоянная времени нагрева при  $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$ , с;  $T''$  – постоянная времени нагрева при  $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$ , с;  $T_o$  – постоянная времени охлаждения, с.

ЭТС непроточного ЭЭН-Д с зонированной электродной системой изображена на рисунке 3 в. Нагрев обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве непроточного ЭЭН-Д с зонированной электродной системой описывается выражением

$$C_p \cdot \rho_c \left( \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v(x) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = q_k, \quad (5)$$

где  $v(x)$  – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на расстоянии  $x$  от начала ЭЭН-Д, м/с;  $q_k$  – мощность тепловыделения в единичном объеме ЭЭН-Д, Вт/м<sup>3</sup>.

Таблица 1 – Электротепловые характеристики непроточных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой при различных соотношениях теплотерь ЭНУ ( $k \cdot F$ ) и интенсивности изменения тепловыделения в обрабатываемую среду ( $E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3$ )  $H \cdot \Pi \cdot L_3$ )

Соотношение	Электротепловые характеристики ЭЭН
$(k \cdot F) >$ $> (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$	$\theta_c(\tau) = \theta_y \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}; \quad \tau = T \cdot \ln \frac{\theta_y - \theta_{cn}}{\theta_y - \theta_c};$ $T = \frac{C_p \cdot M}{k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi}; \quad \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_y - \theta_{cn}}{T} e^{-\frac{\tau}{T}};$ $\theta_y = \left( \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) / \left( 1 - \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi}{k \cdot F} \right).$
$(k \cdot F) <$ $< (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$	$\theta_c(\tau) = \theta_y \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T'}} \right) + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{\tau}{T'}}; \quad \tau = T' \cdot \ln \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{\theta_c - \theta_y};$ $T' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi - k \cdot F}; \quad \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{T'} e^{-\frac{\tau}{T'}};$ $\theta_y = - \left( \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) / \left( \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot L_3 \cdot \Pi}{k \cdot F} - 1 \right).$
$(k \cdot F) =$ $= (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3)$	$\theta_c(\tau) = \frac{\tau}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{bc} \cdot \tau + \theta_{cn}; \quad \tau = \frac{\theta_c - \theta_{cn}}{\frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{bc}};$ $\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{bc} = \frac{1}{T''} + \frac{1}{T_o} \theta_{bc}; \quad T'' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot L_3}.$

При этом мощность тепловыделения в единичном объеме межэлектродного пространства основных зон нагрева (1-, 3-, 5-, 7-, 9- и 11-й), определяется из системы уравнений

$$\begin{cases} q_k = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho_l(\theta_c) \cdot H_k^2}; U_k = I \cdot R_k; I = U / R; \\ U = U_1 + U_{11} = U_3 + U_9 = U_5 + U_7; \\ R = 1 / [1 / (R_1 + R_{11}) + (1 / (R_3 + R_9)) + (1 / (R_5 + R_7))]; \\ R_k = \int_0^{L_k} \rho_l(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H_k dx / \left( \int_0^{L_k} \Pi dx \cdot L_k^2 \right), \end{cases} \quad (6)$$

где  $R_1, R_3, \dots, R_{11}$  – сопротивление основных зон ЭЭН-Д, Ом.

Так как разность потенциалов между дополнительными (промежуточными) электродами ЭЭН-Д незначительна, то нагревом в зонах 2, 4 и 8, 10 можно пренебречь ( $q_k = 0$ ). В 6-й зоне нагревателя между токоподводящими электродами имеется значительная разность потенциалов, следовательно, мощность тепловыделения  $q_k$  ( $q_k = q_6$ ) в единичном объеме межзонного пространства ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$q_6 = \frac{\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2}{\rho_l(\theta_c)} \eta = \frac{(\nabla \varphi)^2 \eta}{\rho_l(\theta_c)}, \quad (7)$$

где  $\varphi$  – потенциал электрического поля обрабатываемой среды, В;  $y$  – текущая координата межэлектродного расстояния ЭЭН-Д, м;  $\nabla$  – оператор Гамильтона.

Тепловое движение обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве непроточного ЭЭН-Д описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_k}{\partial \tau} - \frac{\mu}{\rho_c} \cdot \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} = \beta \cdot g(\theta_{\text{нн}} - \theta_{si}); \\ v(x) = \frac{1}{J_S} \sum_{j=1}^{J_S} v_{kj}; \\ \theta_{\text{нн}} = \theta_{cn} + \int_0^{\tau_p} \frac{\Delta \theta_v \cdot v(x) \cdot \Pi \cdot H(x) \cdot \rho_c}{M_{\text{нн}}} dt; \\ \theta_{si} = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} \theta_f dx, \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $v_k$  – скорость обрабатываемой среды на условно выделенном вертикальном слое  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, м/с;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения обрабатываемой среды,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\theta_{\text{нн}}$  – температура среды над нагревателем,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{si}$  – среднеинтегральная температура среды в межэлектродном пространстве,  $^\circ\text{C}$ ;  $hy_j$  – толщина слоя обрабатываемой среды по оси  $y$ , ЭЭН ( $j=1\dots J_S$ , где  $J_S$  – количество слоев, по оси  $y$ ), м;  $\theta_{cn}$  – начальная температура обрабатываемой среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau_p$  – время нагрева, с;  $\Delta \theta_v$  – разница превышения значений температуры на выходе из ЭЭН-Д и обрабатываемой среды в емкости над нагревателем,  $^\circ\text{C}$ ;  $H(x)$  – межэлектродное расстояние на расстоянии  $x$  от начала ЭЭН-Д ( $H(x) = H_k$ ), м;  $M_{\text{нн}}$  – масса обрабатываемой среды над нагревателем ( $M_{\text{нн}} = M(L_S - L_n - L_{pn}) / L_S$ ;  $L_S = M / (\rho_c \cdot S_{\text{смк}})$ , кг, где  $M$  – масса обрабатываемой среды в нагреваемой емкости, м;  $L_S$  – высота уровня обрабатываемой среды в емкости, м;  $L_n$  – длина ЭЭН-Д, м;  $L_{pn}$  – расстояние между ЭЭН-Д и дном емкости, м;

$S_{\text{смк}}$  – площадь поперечного сечения емкости с обрабатываемой средой,  $\text{м}^2$ );  $\theta_F$  – значения температуры секций ЭЭН-Д по оси  $x$ , превышающие  $\theta_{\text{нн}}$  и обеспечивающие возникновение подъемной силы,  $^{\circ}\text{C}$ .

Распределение температуры в емкости с обрабатываемой средой описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta_E}{\partial \tau} + v_E \frac{\partial \theta_E}{\partial x_E} + \alpha \frac{\partial^2 \theta_E}{\partial x_E^2} = 0, \quad (9)$$

где  $\theta_E$  – температура в емкости с обрабатываемой средой,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v_E$  – скорость обрабатываемой среды в емкости ( $v_E = v(x) \cdot H(x) \cdot \Pi / S_{\text{смк}}$ ),  $\text{м/с}$ ;  $x_E$  – текущая координата длины в емкости,  $\text{м}$ ;  $\alpha$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для теоретического исследования разработанных ММ, содержащих дифференциальные уравнения, в частных производных использовались численные методы путем 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. Блок-схема алгоритма расчета динамических характеристик непроточного ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой представлена на рисунке 4. В приведенной блок-схеме алгоритма используются следующие обозначения:  $\theta_{\text{П}}$  – температура нагрева обрабатываемой среды по требованиям технологического процесса,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты уравнения  $\rho_t = a_0 + a_1 \cdot \theta_c + a_2 \cdot \theta_c^2$ , определяющие зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры ее нагрева;  $Kz$  – количество зон нагрева непроточного ЭЭН-Д;  $I_{sk}$  – количество секций в  $k$ -й зоне непроточного ЭЭН-Д;  $JL$  – количество слоев разностной сетки по высоте емкости (в противоположном направлении оси  $x$ );  $\tau_{\text{max}}$  – наибольшая величина шага по времени,  $\text{с}$ ;  $\tau'$  – итерационный параметр вычисления распределения потенциалов электрического поля;  $\sigma$  – произвольный вещественный параметр при расчете разностными методами;  $\varepsilon$  – погрешность вычислений;  $\theta_s$  – среднеинтегральная температура обрабатываемой среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $IM$  – число итераций;  $P$  – мощность ЭЭН-Д,  $\text{Вт}$ ;  $\theta_c^n, \theta_c^{n+1}$  – температура обрабатываемой среды (воды) на  $i$ -й секции межэлектродного пространства,  $n$ -м и  $n+1$ -м расчетном шаге,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_E^n, \theta_E^{n+1}$  – температура обрабатываемой среды на  $L$ -м расчетном слое емкости,  $n$ -м и  $n+1$ -м расчетном шаге,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v^n, v^{n+1}$  – скорость обрабатываемой среды на  $j$ -м расчетном слое (по оси  $y$ ),  $n$ -м и  $n+1$ -м расчетном шаге,  $\text{м/с}$ . Сравнение расчетных характеристик с экспериментальными показало высокую адекватность разработанных ММ.

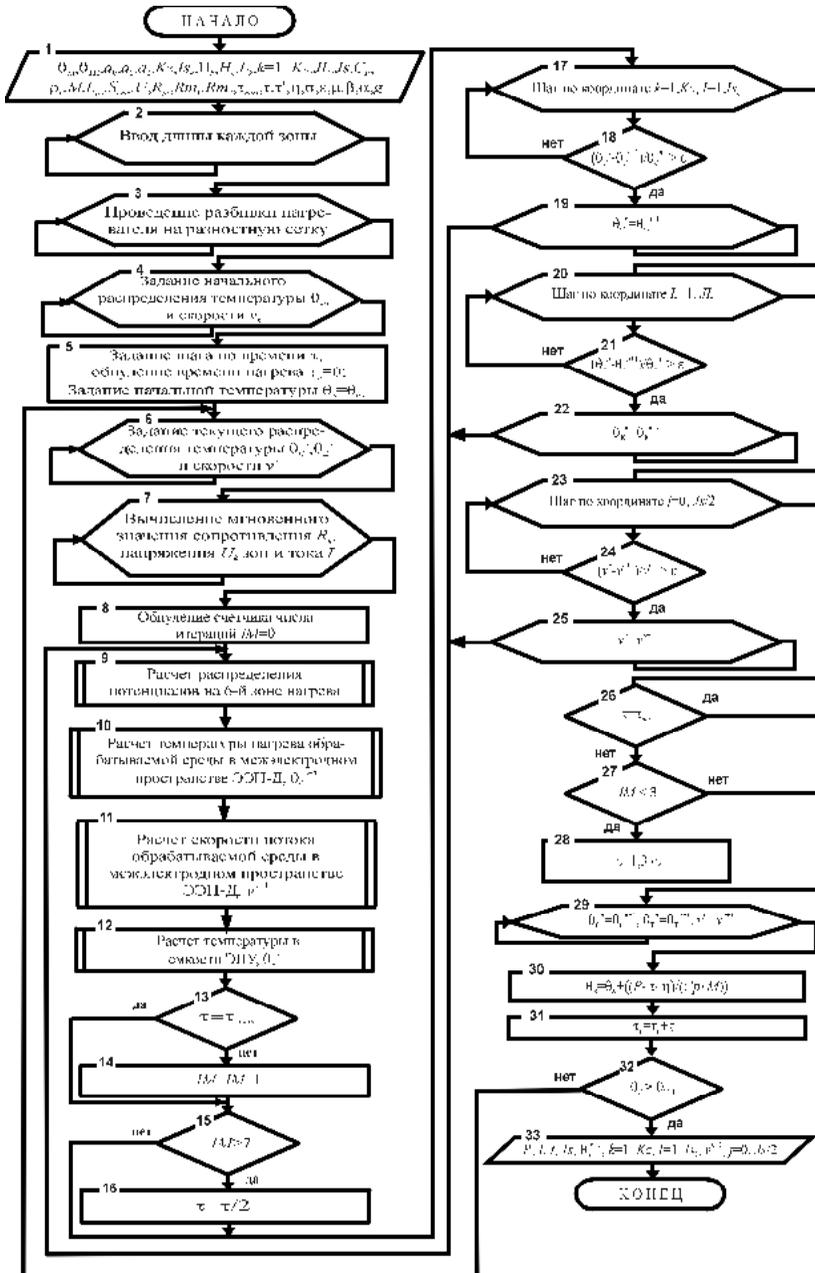


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма расчета динамических характеристик непроточного ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой

**В третьей главе** диссертационной работы разработана методика исследования электрофизических характеристик нагреваемых термолабильных сред, необходимая для описания изменения их удельного электрического сопротивления в зависимости от температуры нагрева и других технологических факторов, оказывающих на него влияние. В диссертации предложенная методика использована при исследовании электрофизических характеристик обраты, так как после переработки и хранения его удельное электрическое сопротивление меняется в зависимости от температуры, кислотности и количество добавленной к обрату соли NaCl. В результате проведены многофакторный эксперимент, математическая обработка его результатов и получена эмпирическая зависимость влияния добавленной к обрату соли NaCl, кислотности и температуры обраты на удельное сопротивление:

$$\begin{aligned} \rho_{пу} = & 2,693\,483\,738 - 0,410\,462\,852 \cdot x'_{1u} - 0,009\,641\,356 \cdot x'_{2u} - 0,032\,606\,998 \cdot x'_{3u} \\ & + 0,024\,624\,079 \cdot x'^2_{1u} - 0,000\,024\,17 \cdot x'^2_{2u} + 0,000\,125\,831 \cdot x'^2_{3u} + \\ & + 0,001\,586\,354 \cdot x'_{1u} \cdot x'_{2u} + 0,002\,475\,782 \cdot x'_{1u} \cdot x'_{3u} + 0,000\,080\,188 \cdot x'_{2u} \cdot x'_{3u}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $x'_{1u}$  – количество добавленной к обрату соли NaCl, г/л;  $x'_{2u}$  – кислотность обраты, °Т;  $x'_{3u}$  – температура обраты, °С.

Исследования электрофизических характеристик обраты показали, что существенное влияние на его удельное сопротивление, помимо температуры, оказывают кислотность и концентрация хлоридов. Увеличение температуры обраты приводит к снижению его удельного сопротивления. На основании проведенных исследований обоснована возможность корректировки (уменьшения) удельного сопротивления обраты кислотностью 14,8 °Т и температурой 10 °С на 42 % путем добавления 3,36 г/л соли NaCl (с последующей корректировкой ее количества в рационе кормления телят) для проведения его термообработки в ЭЭН с расчетной мощностью.

**В четвертой главе** «Методики расчета конструктивных параметров электродных электронагревателей с секционированными и зонированными электродными системами» представлены разработанные алгоритмы расчета ЭЭН с секционированной и зонированной электродными системами, алгоритм многопараметрической техникоэкономической оптимизации многозонных непроточных ЭЭН-Д, а также приведены результаты разработки новых ЭНУ на базе ЭЭН-Д для подогрева обраты и нагрева воды. На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с зонированной электродной системой. В приведенной блок-схеме алгоритма используются следующие обозначения:  $\theta_{с.вх}$  – температура на входе в ЭЭН, °С;  $\theta_{с.вых}$  – температура на выходе из ЭЭН, °С;  $K_3$  – коэффициент запаса по допустимой плотности тока;  $h$  – шаг по длине  $x$ , м;  $U_s$  – разность напряжений на рассчитанных зонах нагрева и напряжения питания, В;  $\rho_u$  – удельное сопротивление при  $\theta_{с.вх}$ , Ом·м;  $\rho_k$  – удельное сопротивление при  $\theta_{с.вых}$ , Ом·м;

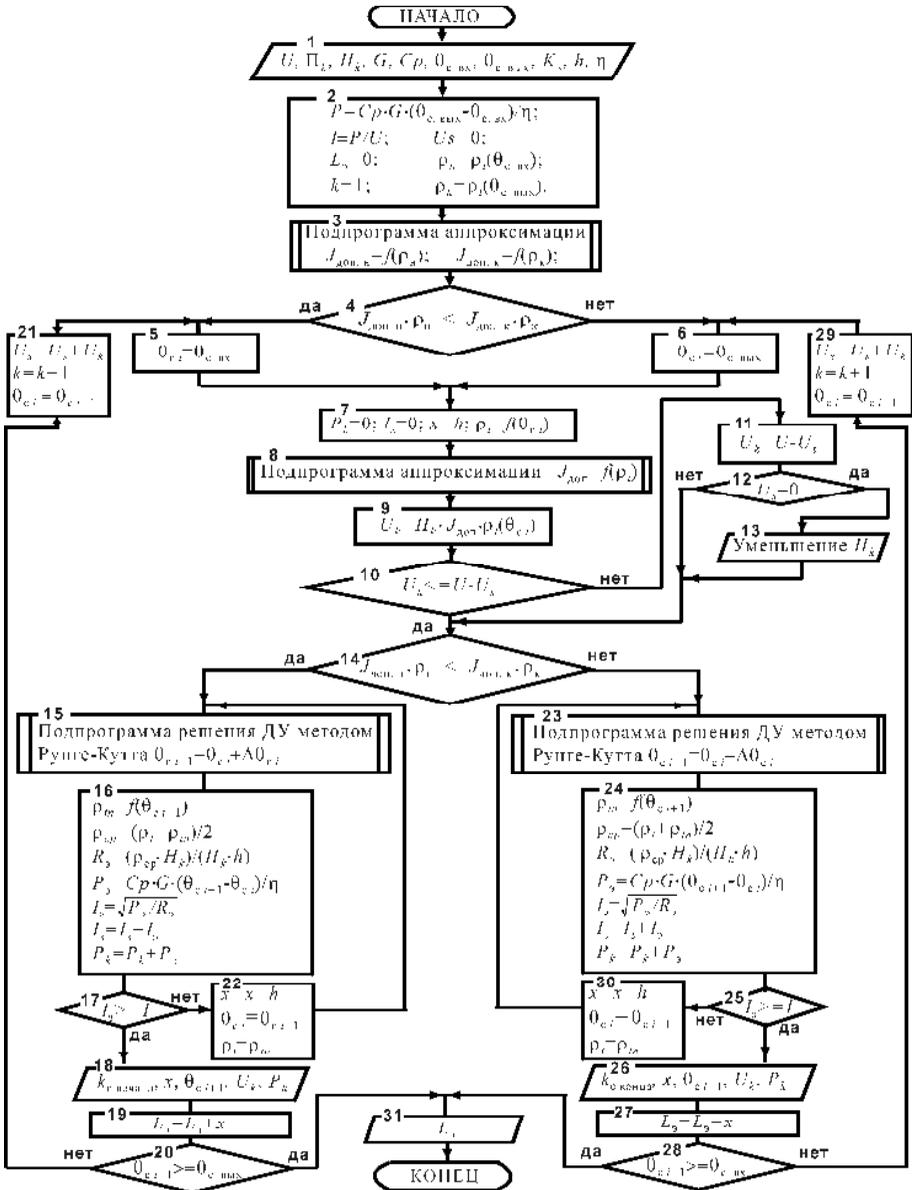


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с зонированной электродной системой

$J_{\text{доп.н}}$  – допустимая плотность тока при  $\rho_n$ ,  $\text{А/м}^2$ ;  $J_{\text{доп.к}}$  – допустимая плотность тока при  $\rho_k$ ,  $\text{А/м}^2$ ;  $I_k$  – ток  $k$ -й последовательно соединенной зоны,  $\text{А}$ ;  $J_{\text{доп}}$  – наибольшая допустимая плотность тока,  $\text{А/м}^2$ ;  $\theta_{c,i}$ ,  $\theta_{c,i+1}$  – температура  $i$ -го и  $i+1$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны ЭЭН,  $^{\circ}\text{С}$ ;  $\Delta\theta_{c,i}$  – приращение температуры  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны ЭЭН,  $^{\circ}\text{С}$ ;  $\rho_m$  – удельное сопротивление на секции ЭЭН,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\rho_{\text{ср}}$  – среднее удельное сопротивление обрабатываемой среды  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ;  $R_i$  – сопротивление обрабатываемой среды  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны,  $\text{Ом}$ ;  $I_i$  – ток  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны,  $\text{А}$ ;  $J_i$  – плотность тока  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны,  $\text{А/м}^2$ ;  $P_i$  – мощность  $i$ -го элементарного участка (секции)  $k$ -й зоны,  $\text{Вт}$ ;  $P_k$  – мощность  $k$ -й последовательно соединенной зоны,  $\text{Вт}$ .

При расчете ЭЭН для обеспечения заданного распределения плотности тока в объеме обрабатываемой среды вначале определяется температура обрабатываемой среды  $\theta_c$ , при изменении текущей длины нагревателя  $x$  на шаге  $h$ , затем – удельное сопротивление  $\rho_l(\theta_c)$ , допустимая плотность тока  $J_{\text{доп}}$  ( $J_{\text{доп}} = f(\rho_l(\theta_c))$ ) и напряжение  $U_k$  на конкретной зоне от начала или конца ЭЭН. На последующем шаге по длине ЭЭН расчет проводится аналогично, однако при этом температура обрабатываемой среды на входе будет равна температуре на выходе нагревателя из предыдущего шага. В процессе решения проводится контроль плотности тока  $J$  и, при необходимости, проводится корректировка межэлектродного расстояния  $H_k$ . Для ЭЭН-Д при этом также можно корректировать количество зон нагрева  $N$ . Параметрическая технико-экономическая оптимизация многозонных ЭЭН-Д проводилась градиентным методом наискорейшего спуска, по результатам которой разработана ЭНУ подогрева обраты и нагрева воды.

**В пятой главе** «Перспективные области многофункционального использования электронагревательных установок на базе многозонных электродных электронагревателей-датчиков» показано, что применение ЭЭН-Д не исчерпывается использованием их в качестве нагревателя и датчика температуры. Результаты теоретических и экспериментальных исследований указывают на возможность выполнения ими функции защиты ЭНУ при отклонении режимов работы от нормальных, контроля количества отложений на электродах и контроля интенсивности кипения воды.

Образование отложений на электродах ЭЭН-Д приводит к образованию дополнительного электрического сопротивления на границе электрод–среда, что вызывает перераспределение напряжений на зонах ЭЭН-Д и изменение величины ИС. Разработанная методика исследований образования кальциево-магниевого отложений в межэлектродном пространстве позволяет получить ИС  $\Delta U$  для различного времени работы ЭЭН-Д при известном распределении отложений по длине электродов. Процесс нагрева среды во времени, при наличии отложений на электродах, на элементарном участке  $\delta x$  в ЭЭН-Д описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 C_p \cdot \rho_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}) \cdot H_{c_j}}; \\
 \theta_{ocj} = \frac{\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{c_j}}{1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc} \cdot \alpha_{noc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}}}; \\
 H_{r_{ocj}} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot T_S + A_4 \cdot T_S^2 + A_5 \cdot x \cdot T_S; \\
 H_{ocj} = 2H_{r_{ocj}}; \\
 U = \sum_{k=1}^N U_{Zk} = \sum_{k=1}^N I \cdot R_{Zk}; \\
 I = U / R; \\
 R = \sum_{k=1}^N R_{Zk}; \\
 R_{ocj} = \frac{H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj})}{h \cdot \Pi}; \\
 R_{c_j} = \frac{H_{c_j} \cdot \rho_t(\theta_{c_j})}{h \cdot \Pi}; \\
 U_{ocj} = \frac{U_{Zk} \cdot R_{ocj}}{R_{c_j} + R_{ocj}}; \\
 U_{c_j} = \frac{U_{Zk} \cdot R_{c_j}}{R_{c_j} + R_{ocj}}; \\
 R_{Zk} = \int_0^{L_k} \frac{H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) + H_{c_j} \cdot \rho_t(\theta_{c_j})}{h \cdot \Pi} dx.
 \end{array} \right. \quad (11)$$

где  $H_{c_j}$  – межэлектродное расстояние, свободное от отложений, на  $j$ -й секции ЭЭН-Д, м;  $U_{c_j}$  – напряжение в межэлектродном пространстве, свободном от отложений, на  $j$ -й секции ЭЭН-Д, В;  $j$  – номер секции с начала ЭЭН-Д;  $\theta_{oc}$  – температура отложений на электродах, °С;  $U_{ocj}$  – падение напряжения на отложениях двух электродов  $j$ -й секции ЭЭН-Д, В;  $\gamma_{0oc}$  – удельная электрическая проводимость отложений обрабатываемой среды, (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $k_o$  – коэффициент теплоотдачи от отложений в обрабатываемую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $H_{ocj}$  – толщина отложений в межэлектродном пространстве на двух электродах  $j$ -й секции ЭЭН-Д, м;  $\alpha_{noc}$  – температурный коэффициент проводимости отложений

обрабатываемой среды,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $H_{r\text{oc}}$  – толщина отложений на одном электроде ЭЭН-Д, рассчитанная по уравнению регрессии распределения отложений по длине электродов для различного времени наработки, м;  $A_0, A_1, \dots, A_5$  – коэффициенты уравнения регрессии распределения отложений по длине электродов для различного времени наработки ЭЭН-Д;  $x$  – координата длины от начала ЭЭН-Д, м;  $T_S$  – время наработки ЭЭН-Д от его включения без отложений до соответствующего замера отложений на электродах ЭЭН-Д, ч;  $U_{Zk}$  – напряжение  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, В;  $k$  – номер зоны ЭЭН-Д;  $R_{Zk}$  – сопротивление  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, Ом;  $R_{ocj}$  – сопротивление отложений на обоих электродах  $j$ -й секции ЭЭН-Д, Ом;  $h$  – длина  $j$ -й секции ЭЭН-Д (равна длине элементарного участка  $\delta x$ ), м;  $R_{cj}$  – сопротивление обрабатываемой среды между электродами на  $j$ -й секции ЭЭН-Д, Ом.

Решение приведенной системы уравнений позволило по известному разбалансу  $\Delta U$  измерительного моста ЭЭН-Д определить количество отложений обрабатываемой среды (накипи воды) на электродах за время наработки  $T_S$ . При этом максимальное относительное несовпадение расчетного разбаланса измерительного моста с экспериментальными значениями в течение времени наработки составило 12,76 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены исследования, направленные на разработку проточных и непроточных ЭЭН и ЭЭН-Д с секционированными и зонированными электродными системами, обеспечивающими допустимые значения плотности тока в межэлектродном пространстве нагревателей и заданную интенсивность нагрева текучих термолabileльных сред.

### Основные научные результаты диссертации

1. Анализ тепловых процессов СХП показал, что основная их часть является низкотемпературными; в значительном количестве тепловых процессов возможен объемный ввод тепловой энергии в обрабатываемую среду, т. е. прямой электронагрев сопротивлением, являющийся термозависимым, так как удельное сопротивление практически всех обрабатываемых с.-х. сред зависит от их температуры, при этом температура и интенсивность нагрева сред ограничиваются допустимой температурой и распределением плотности тока в среде межэлектродного пространства [1, с. 52; 3, с. 15; 5, с. 35; 6, с. 16; 9; 15].

2. Для создания ЭНУ с заданным распределением плотности тока в среде межэлектродного пространства на базе секционированных и зонированных ЭЭН, ЭЭН-Д, а также их эффективного использования выявлены основные электротепловые схемы, разработаны ММ и алгоритмы теоретического исследования их статических и динамических характеристик. Теоретические и экспериментальные исследования процессов теплообмена в ЭЭН показывают, что их динамические характеристики имеют экспоненциальный вид, на который существенное влияние оказывают

коэффициенты сопротивления или проводимости обрабатываемой среды, а также секционирование и зонирование электродных систем ЭЭН, ЭЭН-Д [2, с. 9–11; 6, с. 16–17; 8, с. 26–31]. Разработанные ММ и алгоритмы их исследования позволяют проводить расчет электротепловых характеристик, включая и величину ИС ЭЭН-Д, с погрешностью, не превышающей 4,3 % для непроточного ЭЭН-Д и 8,3 % для проточного относительно экспериментальных данных, что достаточно при их использовании в практическом проектировании ЭНУ. В результате моделирования выявлено, что повышение эффективности работы ЭНУ на базе многозонных ЭЭН и ЭЭН-Д достигается за счет наличия в них внутренних обратных связей, обеспечивающих перераспределение мощности и контроль температурного поля при нагреве обрабатываемой среды [9, с. 23–28; 12, с. 17–25; 19...30].

3. Математическое моделирование статических и динамических электротепловых характеристик непроточных ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой, учитывающее процесс теплового движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, показало высокую адекватность разработанных их ММ и алгоритма исследования (погрешность расчета не превышает 4,3 %), что подтверждается экспериментально измерением во времени ИС в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д, определяемого распределением температурного поля в обрабатываемой среде межэлектродного пространства [9, с. 23–28; 19; 21].

4. Исследования электрофизических характеристик обрата показали, что наибольшее влияние на его удельное сопротивление оказывают кислотность, концентрации хлоридов и температура. При этом повышение кислотности, концентрации хлоридов и температуры обрата приводит к уменьшению его удельного сопротивления [5, с. 35–40; 32].

5. Реализация разработанных инженерных методик расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН, ЭЭН-Д с секционированной электродной системой предусматривает многократное уточнение плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства и последующего сравнения ее с допустимыми значениями, что потребовало разработки специальных алгоритмов и программ для ЭВМ с целью упрощения реализации проводимых расчетов и в конечном итоге привело к снижению материалоемкости ЭНУ на 12 %...24 % по сравнению с материалоемкостью аналогичных ЭНУ с плоскопараллельными ЭЭН [6, с. 16–22; 13...43].

6. Реализация разработанных алгоритма и программы для ЭВМ технико-экономической оптимизации конструктивных параметров многозонного непроточного ЭЭН-Д в ЭНУ подогрева обрата для выпойки телят позволила снизить приведенные затраты на 5,6 % за счет использования ЭЭН-Д [9, с. 23–28; 18; 22; 34].

7. Сравнительный анализ проточных ЭЭН и ЭЭН-Д с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами показал, что ЭЭН с секционированными электродными системами обеспечивают снижение не только материалоемкости, но и

тепловой инерционности на 35,20 % в сравнении с однозонным проточным ЭЭН. Использование же зонированных ЭЭН-Д исключает застойные зоны при компоновке ЭНУ для нагрева вязких текучих сред, но приводит к увеличению их материалоемкости на 71,17 %...219,82 % и снижению инерционности на 19,93 %...31,20 % относительно проточного ЭЭН с однозонной плоскопараллельной электродной системой. Кроме того, зонированные ЭЭН-Д позволяют получить мощный ИС о температуре нагрева среды, более чем в 1000 раз превосходящий ИС от серийно выпускаемых датчиков температуры [10, с. 15–20; 11, с. 338–343].

8. Разработанная методика и алгоритм математического моделирования ИС разбаланса мостовой измерительной схемы проточных многозонных ЭЭН-Д при наличии отложений на электродах показали высокую адекватность предложенной ММ (погрешность не превысила 12 %...14 %), что позволит использовать ее при проектировании ЭНУ с многозонными проточными ЭЭН-Д и повысить эффективность их эксплуатации [7, с. 23–31; 9, с. 23–28; 31].

9. Выполнение ЭЭН-Д одновременно функций нагревателя и датчика температуры не только упрощает систему автоматического регулирования температуры ЭНУ, но и придает им дополнительные свойства многофункциональности, заключающиеся в обеспечении защиты ЭНУ от аварийных режимов работы, в контроле количества отложений на электродах многозонного проточного ЭЭН-Д и сигнализации процесса кипения в непроточных ЭЭН-Д с зонированной электродной системой [9, с. 27–28].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, с госбюджетной тематикой научных исследований кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» в рамках задания перспективного плана научно-исследовательских работ учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» на 2021–2025 годы по теме 4.12. «Совершенствование электродных электронагревателей текучих термолabileльных сред применением секционированных и зонированных электродных систем».

Результаты исследований внедрены в образовательный процесс на кафедре моделирования и проектирования при чтении лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Основы моделирования», а также переданы для использования при разработке и производстве ЭНУ с ЭЭН и ЭЭН-Д в РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси» и РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в организациях и на предприятиях, занимающихся исследованиями, разработкой и проектированием ЭНУ для с.-х. и пищевой промышленности. Техническая новизна результатов диссертационной работы защищена 7 патентами Республики Беларусь на изобретения и 2 свидетельствами о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

**Список публикаций соискателя ученой степени****Статьи в изданиях из перечня изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований**

1. Прищепов, М.А. Повышение эффективности электротепловой обработки термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // *Материалы, технологии, инструменты.* – 1997. – № 1. – С. 52–55.

2. Прищепов, М.А. К вопросу совершенствования непроточных электродных нагревателей-датчиков с зонированной плоскопараллельной электродной системой / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // *Агропанорама.* – 2002. – № 1. – С. 9–11.

3. Прищепов, М.А. Моделирование характеристик емкостного электродного нагревателя-датчика для нагрева термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // *Агропанорама.* – 2004. – № 6. – С. 15–22.

4. 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.

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

6. 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.

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

10. Прищепов, М.А. Сравнительные исследования конструктивных параметров и характеристик проточных электродных электронагревателей с различными электродными системами / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // *Агропанорама.* – 2024. – № 2. – С. 15–20.

11. Прищепов, М.А. Обоснование выбора электротепловой схемы проточных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // *Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».* – Минск: «Издательский дом «Беларуская навука», 2024. – Вып. 57. – С. 338–343.

### Статьи в других изданиях

12. 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.

13. 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. / БелНИИагроэнерго. – Минск, 1994. – С. 35–46.

14. Прищепов, М.А. К вопросу разработки проточных электродных электронагревателей (ЭЭН) / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Вопросы агроэнергетики. – Минск : Технопринт, 2001. – С. 218–223.

15. Рутковский, И.Г. Перерабатываем восковое сырье / И.Г. Рутковский // Пчеловодство. – 2003. – № 8. – С. 35.

### Материалы конференций и тезисы докладов

16. Прищепов, М.А. К вопросу расчета конструктивных параметров секционированных проточных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Сб. тр. отчетной науч.-техн. конф. аспирантов и докторантов БАТУ / БАТУ. – Минск, 1995. – С. 27–31.

17. Прищепов, М.А. К вопросу анализа чувствительности зонированных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин : тезисы второй республ. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 1996. – С. 22.

18. Прищепов, М.А. Оптимизация конструктивных параметров многозонного электродного пастеризатора молока / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 1997. – С. 129–137.

19. Прищепов, М.А. Математическое моделирование электротепловых характеристик емкостных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Моделирование и прогнозирование аграрных энергосберегающих процессов и технологий : матер. Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / БАТУ. – Минск, 1998. – Ч. 2. – С. 116–117.

20. Рутковский, И.Г. Информационная чувствительность проточных электродных электронагревателей-датчиков (ЭЭН-Д) / И.Г. Рутковский // Молодежь, наука, аграрное образование и производство: сб. статей науч.-практ. конф. / ВГАВМ, – Витебск, 1999. – С. 190–191.

21. Рутковский, И.Г. Математическое моделирование информационной чувствительности при емкостном многозонном электродном электронагреве / И.Г. Рутковский // Молодежь, наука, аграрное образование и производство: сб. статей науч.-практ. конф. / ВГАВМ, – Витебск, 1999. – С. 192–193.

22. Прищепов, М.А. Оптимизация информационной чувствительности емкостных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский, W. Tanas // Aktualne problemy inzynierii rolniczej w aspekcie integracji Polski z unia Europejska : матер. Jubileuszowa miedzynarodowa konferencja naukowa, XXX lat Wydzialu Techniki Rolniczej AR w Lublinie – Lublin, 2000. – С.151–153.

23. Прищепов, М.А. К вопросу моделирования электротепловых процессов при обработке токопроводящей среды емкостным электродным электронагревателем с зонированной плоскопараллельной электродной системой / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин : матер. 3-й конф. : в 2 ч. / БАТУ. – Минск, 2002. – Ч. 1. – С. 158–159.

24. Прищепов, М.А. Повышение качества обработки термолабильных сред в электродных электронагревательных установках / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Перспективы и направления развития энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 2006. – С. 69–71.

25. Прищепов, М.А. Регулирование режимов тепловой обработки термолабильных сред при электродном нагреве / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Перспективы и направления развития энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 2007. – С. 274–277.

26. Прищепов, М.А. Обоснование допустимых электрических параметров электродных нагревателей для тепловой обработки сельскохозяйственных термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 2009. – С. 192–194.

27. Прищепов, М.А. Некоторые особенности электротепловой обработки в сельскохозяйственном производстве / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский, А. Бжостович // Problems of agricultural engineering : матер. XV Intern. Sci. Conf. / Miedzyzdroje. – Poland, 2012. – С. 121–122.

28. Рутковский, И.Г. Применение электродных нагревательных установок для снижения концентрации акриламида в обрабатываемой среде / И.Г. Рутковский // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / БАТУ. – Минск, 2013. – С. 308–312.

29. Прищепов, М.А. Моделирование работы проточного электродного нагревателя / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 2019. – С. 180–182.

30. Прищепов, М.А. Особенности электротепловой обработки текучих термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БАТУ. – Минск, 2020. – С. 496–498.

31. Прищепов, М.А. Моделирование образования отложений на электродах проточных многозонных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее

условие инновационного развития АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БГАТУ. – Минск, 2023. – С. 228–231.

32. Рутковский, И.Г. Изучение зависимости электрофизических характеристик обраты от его физико-химических свойств / И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БГАТУ. – Минск, 2023. – С. 236–239.

33. 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. с междунар. участ. им. Г.П. Ерошенко / ФГБОУ ВО Вавиловский универ. – Саратов, 2023. – С. 287–294.

34. Прищепов, М.А. Разработка непроточных электронагревательных установок на базе многозонных электродных электронагревателей-датчиков / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Промышленная политика, энергетика и цифровизация: теория и практика трансформации : матер. III Междунар. науч.-практ. конф. / ГБОУ ВО «Волжский институт экономики, педагогики и права», Волгоградский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. – Волгоград, 2023. – С. 123–131.

#### **Патенты на изобретения**

35. Электронагреватель текучих токопроводящих сред : пат. ВУ 2048 / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 30.03.98.

36. Электронагреватель токопроводящих сред : пат. ВУ 2840 / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 30.06.99.

37. Электронагреватель токопроводящих сред : пат. ВУ 3159 / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 30.12.99.

38. Электронагреватель текучих токопроводящих сред : пат. ВУ 3945 / Л.С. Герасимович, М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 30.06.2001.

39. Электронагреватель токопроводящей жидкой среды, в частности, воды или обраты молока : пат. ВУ 12951 / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский. – Оpubл. 28.02.2009.

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

41. Электронагреватель текучей токопроводящей среды : пат. ВУ 14337 / М.А. Прищепов, А.Н. Кубарко, И.Г. Рутковский, Н.В. Рутковская, М.С. Околот, П.Н. Тукайло. – Оpubл. 27.01.2011.

#### **Свидетельства о регистрации компьютерных программ**

42. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 291 Республика Беларусь. Расчет секционированного проточного электродного нагревателя / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский (ВУ). – № С20100155; заявл. 29.12.2010 г.; опубл. 17.02.2011 г.

43. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 426 Республика Беларусь. Расчет многозонного проточного электродного нагревателя / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский (ВУ). – № С20120035; заявл. 18.04.2012 г.; опубл. 18.05.2012 г.

## РЕЗЮМЕ

Рутковский Иосиф Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ  
ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ТЕКУЧИХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ  
СРЕД ПРИМЕНЕНИЕМ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ  
И ЗОНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ**

**Ключевые слова:** секционированный электронагреватель, многозонный электронагреватель, электродная система, термолабильная среда, численный метод, математическая модель, алгоритм расчета, оптимизация.

**Цель исследования:** снижение материалоемкости и тепловой инерционности электронагревательных установок (ЭНУ) с электродными электронагревателями (ЭЭН), а также расширение их функциональных возможностей и областей рационального использования.

**Методы исследований:** при решении поставленных задач использовались комплексные теоретические и экспериментальные методы исследований; решение задач проводилось методами аналитического и численного моделирования, теоретического анализа, вычислительного и натурального эксперимента.

**Полученные результаты и их новизна:** проведен анализ тепловых процессов сельскохозяйственного производства, обоснованы пути совершенствования ЭЭН, разработан математический аппарат исследования характеристик ЭЭН, выявлено влияние кислотности и количества добавляемой соли на удельное сопротивление обрата, разработаны методики расчета и оптимизации конструктивных параметров секционированных ЭЭН и многозонных электродных электронагревателей-датчиков (ЭЭН-Д), проведена технико-экономическая оптимизация параметров многозонного непроточного ЭЭН-Д, обоснованы перспективные области многофункционального использования ЭНУ на базе многозонных ЭЭН-Д для выполнения ими функции защиты ЭНУ при отклонении режимов работы от нормальных (в аварийных режимах), контроля количества отложений на электродах и процесса кипения. Результаты диссертационных разработок защищены 7 патентами Республики Беларусь на изобретения и 2 свидетельствами о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

**Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения:** полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в организациях и на предприятиях, занимающихся исследованиями, разработкой и проектированием ЭНУ для с.-х. и пищевой промышленности.

## РЭЗІЮМЭ

Руткоўскі Іосіф Генадзьевіч

**УДАСКАНАЛЕННЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ  
ЭЛЕКТРАНАГРАВАЛЬНІКАЎ ЦЯКУЧЫХ ТЭРМАЛАБІЛЬНЫХ  
АСЯРОДДЗЯЎ СКАРЫСТАННЕМ СЕКЦЫЯНІРАВАНЫХ  
І ЗАНІРАВАНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СІСТЭМ**

**Ключавыя словы:** секцыяніраваны электранагравальнік, шматзонны электранагравальнік, электродная сістэма, тэрмалабільнае асяроддзе, лікавы метаад, матэматычная мадэль, алгарытм разліку, аптымізацыя.

**Мэта даследавання:** зніжэнне матэрыялаёмкасці і цеплавой інэрцыйнасці электранагравальных устаноў (ЭНУ) з электроднымі электранагравальнікамі (ЭЭН), а таксама пашырэнне іх функцыянальных магчымасцяў і абласцей рацыянальнага выкарыстання.

**Метады даследаванняў:** пры вырашэнні пастаўленых задач выкарыстоўваліся комплексныя тэарэтычныя і эксперыментальныя метады даследаванняў; рашэнне задач праводзілася метадамі аналітычнага і лікавага мадэлявання, тэарэтычнага аналізу, вылічальнага і натурнага эксперымента.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены аналіз цеплавых працэсаў сельскагаспадарчай вытворчасці, абгрунтаваны шляхі ўдасканалення ЭЭН, распрацаваны матэматычны апарат даследавання характарыстык ЭЭН, выяўлены ўплыў кіслотнасці і колькасці дададзенай солі на ўдзельнае супраціўленне аб'ектлушчанага малака, распрацаваныя метадыкі разліку і аптымізацыі канструктыўных параметраў секцыяніраваных ЭЭН і шматзонных электродных электранагравальнікаў-датчыкаў (ЭЭН-Д), праведзена тэхніка-эканамічная аптымізацыя параметраў шматзоннага непраточнага ЭЭН-Д, абгрунтаваны перспектыўныя вобласці шматфункцыянальнага выкарыстання ЭНУ на базе шматзонных ЭЭН-Д для выканання імі функцыі абароны ЭНУ пры адхіленні рэжымаў працы ад нармальных (у аварыйных рэжымах), кантролю колькасці адкладаў на электродах і працэсу кіпення. Вынікі дысертацыйных распрацовак абаронены 7 патэнтамі Рэспублікі Беларусь на вынаходствы і 2 сведчаннямі аб рэгістрацыі камп'ютэрных праграм у Нацыянальным цэнтры інтэлектуальнай уласнасці Рэспублікі Беларусь.

**Рэкамендацыі па практычным выкарыстанні вынікаў, вобласць прымянення:** атрыманыя вынікі могуць быць рэкамендаваныя для выкарыстання ў арганізацыях і на прадпрыемствах, якія займаюцца даследаваннямі, распрацоўкай і праектаваннем ЭНУ для сельскагаспадарчай і харчовай прамысловасці.

## SUMMARY

Iosif Rutkouski

### IMPROVEMENT OF ELECTRODE ELECTRIC HEATERS FOR FLUID THERMOLABILE MEDIA USING SEGMENTED AND ZONED ELECTRODE SYSTEMS

**Keywords:** segmented electric heater, multizone electric heater, electrode system, thermolabile medium, numerical method, mathematical model, calculation algorithm, optimization.

**The purpose of the research** is to reduce the materials consumption and thermal inertia of electroheat installations (EHI) with electrode electric heaters (EEH), as well as to expand their functionality and areas of rational use.

**The methods used:** complex theoretical and experimental research methods were used in solving the set problems; the solution of the tasks was carried out by methods of analytical and numerical modeling, theoretical analysis, computational and full scale experiments.

**The results obtained and their novelty:** the analysis of thermal processes in agricultural production has been carried out, the ways of improving the EEH have been substantiated, the mathematical apparatus for studying the characteristics of EEH has been developed, the effect of acidity and the amount of added salt on the resistivity of skimmed milk has been identified, methods for calculating and optimizing the design parameters of segmented EEH and multizone electrode electric heaters-sensors (EEH-S) have been developed, technical and economic optimization of the parameters of multizone non-flowing EEH-S has been carried out, promising areas of multifunctional use of EHI based on multizone EEH-S have been substantiated to perform the function of protecting EHI when operating modes deviate from normal (in emergency modes), as well as controlling the amount of deposits on the electrodes and the boiling process. The results of the dissertation research are protected by 7 patents for inventions of the Republic of Belarus and 2 certificates of computer programs registration at the National Center of Intellectual Property of the Republic of Belarus.

**The practical value of the research and spheres of application:** the results obtained can be recommended for using by the organizations and enterprises engaged in research, development and design of EHI for agriculture and food industry.



Научное издание

**Рутковский** Иосиф Геннадьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ  
ТЕКУЧИХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СРЕД ПРИМЕНЕНИЕМ  
СЕКЦИОНИРОВАННЫХ И ЗОНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве (технические науки)

Ответственный за выпуск И. Г. Рутковский  
Компьютерная верстка И. Г. Рутковского

Подписано в печать 27.06.2024. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,68. Уч.-изд. л. 1,31. Тираж 60. Заказ 375.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 06.09.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, г. Минск.