

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М. А. Прищепов, И. Г. Рутковский

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ
ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ ТЕКУЧИХ
ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СРЕД С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ
И ЗОНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ**

Минск
БГАТУ
2025

Прищепов, М. А. Усовершенствованные электродные электронагреватели текучих термолабильных сред с секционированными и зонированными электродными системами / М. А. Прищепов, И. Г. Рутковский. – Минск : БГАТУ, 2025. – 224 с. : ил. – ISBN 978-985-25-0284-9.

В монографии проведен анализ тепловых процессов сельскохозяйственного производства, обоснованы пути совершенствования электродных электронагревателей, разработан математический аппарат исследования характеристик электродных электронагревателей, разработаны методики расчета и оптимизации конструктивных параметров секционированных электродных электронагревателей и многозонных электродных электронагревателей-датчиков, обоснованы перспективные области многофункционального использования электронагревательных установок на базе многозонных электродных электронагревателей-датчиков для выполнения ими функции защиты электронагревательных установок при отклонении режимов работы от нормальных (в аварийных режимах), контроля количества отложений на электродах и процесса кипения.

Для научных работников, аспирантов и инженерно-технического персонала, занимающихся исследованиями, разработкой и проектированием электронагревательных установок для сельскохозяйственной и пищевой промышленности.

Табл. 19. Ил. 57. Библиогр. 122 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (протокол № 9 от 30.12.2024 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Электрические системы» Белорусского национального
технического университета *М. А. Короткевич*;
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Автоматизация производственных процессов и электротехника»
УО «Белорусский государственный
технологический университет» *О. И. Александров*

СОДЕРЖАНИЕ

Термины и определения	6
Перечень сокращений и обозначений	8
Введение	9
ГЛАВА 1 Анализ технических средств электродного электронагрева и способов регулирования режимов тепловой обработки	11
1.1 Технологические требования к тепловым режимам нагрева текучих термолабильных сред	11
1.2 Современные технические средства электродного электронагрева термолабильных сред и предъявляемые к ним технические требования	15
1.3 Способы регулирования режимов тепловой обработки термолабильных сред при электродном электронагреве	18
ГЛАВА 2 Теоретические и экспериментальные исследования электродных электронагревателей	22
2.1 Теоретические предпосылки для совершенствования электродных электронагревателей	22
2.2 Математические модели основных электротепловых схем электродных электронагревателей	25
2.2.1 Проточные электродные электронагреватели	25
2.2.2 Непроточные электродные электронагреватели с плоскопараллельной электродной системой	30
2.3 Исследование статических и динамических характеристик основных электротепловых схем электродных электронагревателей	57
2.3.1 Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной электродной системой	57
2.3.2 Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей-датчиков с зонированной электродной системой	67
2.3.3 Исследование статических характеристик проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной и секционированной электродной системой	70
2.3.4 Исследование статических и динамических характеристик проточных многозонных электродных электронагревателей-датчиков	76

2.4 Характеристики электродных электронагревателей, функционально зависимые от распределения температуры обрабатываемой среды	81
2.5 Влияние физических и конструктивных параметров электродных электронагревателей-датчиков на их электротепловые характеристики	87
ГЛАВА 3 Исследование электрофизических характеристик сельскохозяйственных термолабильных сред	100
3.1 Методика исследования электрофизических характеристик сельскохозяйственных термолабильных сред	101
3.2 Математическая обработка результатов многофакторного эксперимента и построение математических моделей электрофизических характеристик сельскохозяйственных термолабильных сред	106
3.3 Обоснование допустимых электрических параметров электродных электронагревателей для тепловой обработки сельскохозяйственных термолабильных сред	119
ГЛАВА 4 Методики расчета конструктивных параметров электродных электронагревателей с секционированными и зонированными электродными системами	124
4.1 Методика расчета непроточных электродных электронагревателей-датчиков с плоскопараллельной многозонной электродной системой	125
4.2 Методики расчета основных электротепловых схем проточных электродных электронагревателей с секционированными и многозонными электродными системами	130
4.3 Техничко-экономическая оптимизация конструктивных параметров многозонных непроточных электродных электронагревателей-датчиков	141
4.4 Разработка электронагревательных установок сельскохозяйственного назначения на базе многозонных электродных электронагревателей	155
4.5 Сравнительный анализ эффективности проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами	159

ГЛАВА 5 Перспективные области многофункционального использования электронагревательных установок на базе многозонных электродных электронагревателей-датчиков . . .	166
5.1 Математическое моделирование электротепловых характеристик многозонных электродных электронагревателей-датчиков при отклонении режимов работы от нормальных	166
5.2 Математическое моделирование информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы проточных многозонных электродных электронагревателей-датчиков при наличии отложений на электродах	169
5.3 Исследование информационного сигнала непроточных электродных электронагревателей-датчиков с зонированной системой электродов в режиме кипения	201
Список использованной литературы	206
Приложение А Результаты обработки многофакторного эксперимента	218
Приложение Б Результаты технико-экономической оптимизации параметров многозонного непроточного электродного электронагревателя-датчика	220
Приложение В Схема управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д	222

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

длина (высота) секции или зоны электродного электронагревателя (ЭЭН) токопроводящих сред – это расстояние по направлению течения токопроводящей среды в проточном ЭЭН или по направлению теплового движения нагретой токопроводящей среды в непроточном ЭЭН

зона – участок межэлектродного пространства ЭЭН, который характеризуется шириной и межэлектродным расстоянием, длина (высота) которого определяется границами электродов

зона нагрева – параллельное соединение условно выделенных секций в межэлектродном пространстве двух, расположенных друг напротив друга электродов ЭЭН токопроводящих сред, к которым питающее напряжение прикладывается или полностью, при наличии в ЭЭН только двух электродов, или частично, при наличии в ЭЭН нескольких пар электродов

зона дополнительного нагрева – участок межэлектродного пространства между соседними электродами, расположенными на одной стенке корпуса ЭЭН

зонирование – последовательное соединение зон нагрева

многозонный ЭЭН – это ЭЭН токопроводящих сред, который содержит два основных токоподводящих электрода и один или несколько дополнительных (промежуточных) электродов, каждый из которых расположен или напротив основного токоподводящего электрода, или напротив другого дополнительного (промежуточного) электрода, при этом межэлектродные пространства образованы расположенными друг напротив друга парами электродов, а зоны нагрева, образованные парами электродов, имеют последовательное соединение

многозонный электродный электронагреватель-датчик (ЭЭН-Д) – это многозонный ЭЭН, параллельно которому дополнительно присоединены два последовательно соединенных резистора (переменный и постоянный), так что построен измерительный мост, в измерительную диагональ которого, образованную между одним из дополнительных (промежуточных) электродов и общей точкой соединенных последовательно дополнительных резисторов,

включен чувствительный (измерительный) элемент системы автоматического регулирования

промежуточный (дополнительный) электрод – это электрод многозонного ЭЭН, расположенный или напротив основного токоподводящего электрода, или напротив другого промежуточного (дополнительного) электрода, к которому питающее напряжение прикладывается частично

секционирование – условное выделение определенного количества секций по длине межэлектродного пространства двух, расположенных друг напротив друга электродов электронагревателя токопроводящих сред, к которым питающее напряжение прикладывается полностью, при наличии в ЭЭН только двух электродов, или частично, при наличии в ЭЭН нескольких пар электродов

секционированный ЭЭН – это ЭЭН токопроводящих сред, расстояние между электродами и (или) ширина электродов которого изменяются в направлении градиента температуры нагрева, а межэлектродное пространство условно разделено по направлению градиента температуры нагрева на секции

секция – отдельный, условно выделенный участок межэлектродного пространства между двумя электродами ЭЭН токопроводящих сред, который характеризуется межэлектродным расстоянием, шириной и длиной (высотой) электродов

слой обрабатываемой среды – это отдельный, условно выделенный участок межэлектродного пространства с обрабатываемой средой между одной или несколькими парами расположенных друг напротив друга электродов ЭЭН, по направлению течения токопроводящей среды в проточном ЭЭН или по направлению теплового движения нагретой токопроводящей среды в непроточном ЭЭН, который характеризуется шириной и длиной (высотой) электродов, а также толщиной, являющейся частью межэлектродного расстояния

термолabileльная среда – термонеустойчивая среда, свойства которой зависят от температуры и реагируют на ее изменение, при нагреве – изменяются, а при нагреве выше допустимой температуры – изменяются необратимо

электротепловая схема ЭЭН – схема соединений электродной системы, подключения питающего напряжения, направления градиента температуры и направления перемещения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

И – интегральный закон регулирования
ИК – инфракрасный нагрев
ИС – информационный сигнал
КПД – коэффициент полезного действия
КПТ – контактная поверхность теплообмена
КРС – крупный рогатый скот
ММ – математическая модель
П – пропорциональный закон регулирования
ПД – пропорционально-дифференциальный закон регулирования
ПИ – пропорционально-интегральный закон регулирования
ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования
САР – система автоматического регулирования
СВЧ – сверхвысокочастотный нагрев
с.-х. – сельское хозяйство
СХП – сельскохозяйственное производство
ТКС – температурный коэффициент сопротивления
ТКП – температурный коэффициент проводимости
ТЭН – трубчатый электронагреватель
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭН – электронагреватель
ЭНУ – электронагревательная установка
ЭТС – электротепловая схема
ЭЭН – электродный электронагреватель
ЭЭН-Д – электродный электронагреватель-датчик
ЭЭНУ – электродная электронагревательная установка

ВВЕДЕНИЕ

Косвенный электронагрев на основе использования ТЭНов широко распространен при получении тепловой энергии. Существенные недостатки косвенного нагрева заключаются в ограниченной температуропроводности обрабатываемых сред и невысокой допустимой температуре на КПД. Поэтому в ЭНУ с традиционными ЭН на основе протяженных металлических электронагревателей необходимо использовать промежуточные теплоносители, что повышает материалоемкость установок, их тепловую инерционность, снижает тепловой КПД и готовность к работе [1, с. 52–59].

Распространенные технологии нагрева термолabileльных сред с.-х. назначения, основанные на внешнем подводе тепловой энергии посредством промежуточных теплоносителей (воды, металла, масла) для нагрева молока, соков, мелассы, корнеклубнеплодов и прочего, не эффективны из-за высокой неравномерности нагрева обрабатываемой среды по объему, сложности регулирования температуры и высокой энергоемкости. Устранение этих недостатков в ЭНУ возможно при переходе к объемному вводу энергии в обрабатываемую среду.

В настоящее время для приготовления и разогрева пищи широкое распространение получили микроволновые установки. Однако достаточного применения в СХП они не получили по причине высокой стоимости, ограниченного объема обрабатываемой среды и мощности нагрева. Значительно снизить стоимость и повысить энергоэффективность электротепловой обработки можно применением ЭЭНУ. При этом подвод тока к обрабатываемой среде необходимо осуществлять через токоподводящие электроды.

Электротепловая обработка различных токопроводящих сред с помощью ЭЭНУ имеет высокий КПД, электронагревательные установки отличаются простотой конструкции, ремонтпригодностью, пожаробезопасностью и относительно невысокой стоимостью, что предполагает их широкое практическое применение. Однако выраженная зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры нагрева может привести к превышениям допустимых значений плотности тока, лавинообразному росту отложений на электродах и нежелательному электрохимическому воздействию на обрабатываемую среду. Для предотвращения этого

требуется принятие дополнительных мер по обеспечению равномерности нагрева, что усложняет конструкцию, расчет и эксплуатацию таких установок. Сложность протекающих в них электротепловых процессов затрудняет применение существующих аналитических методик расчета. Требуется разработка более современных численных методов расчета с использованием ЭВМ. Использование таких расчетов электротепловых процессов в ЭНУ с ЭЭН позволит усовершенствовать их конструкцию, исключить превышение допустимых значений плотности тока и уменьшить нежелательные электрохимические процессы на электродах [2, с. 52].

При электродном электронагреве предъявляются жесткие требования к материалу электродов и плотности тока в межэлектродном пространстве. Обработываемые с.-х. термолабильные среды отличаются высоким ТКС и низкой термической устойчивостью. Повышение равномерности нагрева позволит более широко применять электродный нагрев для электротепловой обработки соков, мелассы, молока и других термолабильных сред, поэтому исследования, направленные на создание ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами, являются актуальными и имеют важное народнохозяйственное значение. Разработка, создание и использование в ЭНУ секционированных и зонированных ЭЭН, обеспечивающих контроль температуры и отложений обрабатываемой среды, позволяет повысить качество электротепловой обработки и снизить расход электроэнергии.

Монография посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, включающим разработку методик, алгоритмов и программ расчета и оптимизации конструктивных параметров энергоэффективных ЭЭН с секционированными и зонированными электродными системами для тепловой обработки с.-х. термолабильных сред.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВА И СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Технологические требования к тепловым режимам нагрева текучих термолабильных сред

Тепловая энергия в современном СХП широко применяется для пастеризации и стерилизации, подогрева и сушки различных сред, для создания необходимых температурных режимов животным и растениям. Она является незаменимым элементом современных технологий производства с.-х. продукции. При этом потребление тепловой энергии во многих с.-х. технологических процессах достигает 60 %...80 % по сравнению с другими видами энергии. Особенность СХ заключается в рассредоточенном характере производства, наличии термочувствительных биологических объектов, необходимости тепловой обработки разнообразных термолабильных сред. Поэтому в СХП требуется большое количество низкопотенциальной энергии, значительные затраты на ее транспортирование, а также наличие технических средств, обеспечивающих качественное проведение тепловой обработки. Перечень основных низкотемпературных тепловых процессов, используемых в современном с.-х., представлен в таблице 1.1 [3, с. 6–11; 4, с. 6–9; 5, с. 5–66; 6, с. 15–16; 7; 8; 9].

Таблица 1.1

Основные технологические процессы
и параметры низкотемпературного нагрева обрабатываемой среды

Технологические процессы по основным отраслям с.-х.	Параметры низкотемпературного нагрева	
	Температура, °С	Продолжительность
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<u>Животноводство</u>		
Подогрев питьевой воды:		
для КРС	5...14	В течение суток
молодняка КРС	12...15	В теч. суток
поения телят	до 37	0,2...0,3 ч

Технологические процессы по основным отраслям с.-х.	Параметры низкотемпературного нагрева	
	Температура, °С	Продолжительность
Подогрев молока, обраты и овсяного киселя для выпойки телят	35...37	0,2...0,3 ч
Подогрев питьевой воды:		
для свиней на откорме	1...3	В течение суток
свиноматок с сосунками	12...15	«То же»
поросят отъемшей	10	« »
кур-несушек	10...13	« »
Мойка корыт, кормушек и станков	45	0,5...1 ч
Мойка фляг, поддошников и ведер	50	«То же»
Мойка доильных аппаратов	90	« »
Мойка животных	30...40	« »
Подогрев жидких кормов	25...30	« »
Разведение концентрированных кормов	10	« »
Заваривание сенного настоя	100	« »
<u>Растениеводство</u>		
Подогрев поливочной воды	20...30	Периодически
Стерилизация почвы	80	6...8 суток
<u>Кормопроизводство</u>		
Запаривание грубых кормов	60...70	8...10 ч
Запаривание пищевых отходов и корнеплодов	90...100	0,5...0,8 ч
Варка сочных кормов	100...120	0,6...2,0 ч
Осолаживание концентрированных кормов	55...60	3...4 ч
Дрожжевание зерновых кормов	30...35	6...9 ч
Приготовление овсяного киселя для телят	до 100	0,6...0,9 ч
<u>Консервное производство</u>		
Варка маринадов и сиропов	100	0,15...0,25 ч
Стерилизация тары	100...120	0,5 ч
Пастеризация в таре	95	0,5 ч
Приготовление соков	70...92	0,65...0,8 ч

Окончание таблицы 1.1

Технологические процессы по основным отраслям с.-х.	Параметры низкотемпературного нагрева	
	Температура, °С	Продолжительность
<u>Первичная обработка молока</u>		
Пастеризация	до 92	2,5...3 с
Стерилизация	115...120	0,3...0,5 с
Ультравысокотемпературная стерилизация	135...145	2...4 мс
<u>Свеклосахарное производство</u>		
Диффузия сахарозы	80	«В потоке»
Очистка сока	80...90	0,13...0,17 ч
Сатурация сока	100	«В потоке»
Выпаривание сока	80	« »
Варка сока	80	« »
<u>Хранение с.-х. продукции</u>		
Нагрев хладагентов в холодильной технике	30...50	«В течение работы»
Размораживание воздухоохладителей в холодильных камерах	60	«Периодически»
Увлажнение воздуха в хранилищах	100	« »
<u>Ремонтное производство и автотракторный парк</u>		
Мойка узлов и деталей	80...90	до 1,5 ч
Подогрев двигателей внутреннего сгорания	0...70	0,08...4 ч
<u>Быт сельского населения</u>		
Кипячение воды	до 100	0,2...1 ч
Подогрев воды	до 85	1...8 ч
Подогрев пищи	30...32	до 1,5 ч
Варка пищи	100...120	0,6...1,3 ч

Приведенные в таблице 1.1 технологические процессы низкотемпературного нагрева являются основой теплопотребления в с.-х. и обеспечиваются в основном тепловой энергией, получаемой при сжигании жидкого, твердого и газообразного органического топлива, а также путем преобразования электрической энергии в тепловую.

Потребление электрической энергии для тепловых нужд в с.-х. возрастает в связи с ее известными преимуществами: возможностью обеспечения более высокой точности поддержания температуры обрабатываемой среды, улучшением санитарно-гигиенических условий труда, равномерностью и избирательностью нагрева обрабатываемой среды, меньшими трудозатратами и меньшей пожароопасностью ЭНУ при эксплуатации, что важно при постоянном снижении числа работающих в с.-х., а также возможностью multifunctional использования и автоматизации ЭНУ [3, с. 25]. Кроме того, доля использования электрической энергии для тепловых нужд на современном этапе будет возрастать в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС и использованием двухставочных дифференцированных тарифов на электрическую энергию.

Практически во всех технологических процессах (таблица 1.1), кроме ограничения по температуре обрабатываемой среды, существует ограничение по допустимой температуре на КПП (при поверхностном вводе тепловой энергии). Поэтому при косвенном электронагреве существует техническое противоречие между высокой температурой на поверхности рабочего резистивного тела и требуемой (низкой) температурой нагрева обрабатываемой среды [3, с. 14–20; 4, с. 6–9; 7].

В современных ЭНУ косвенного нагрева данная проблема решается путем увеличения скорости перемещения обрабатываемой среды относительно контактной поверхности теплообмена или использованием промежуточных теплоносителей (воздуха, воды, масла, массива металла, ИК-излучения). Однако в таких установках, за исключением ИК-нагрева, существенно возрастают тепловая инерционность и материалоемкость. Это, в свою очередь, приводит к повышению их массы, стоимости, инерционности, что усложняет процесс регулирования температуры обработки и снижает КПД ЭНУ.

Основным требованием, предъявляемым к низкотемпературному электронагреву, является обеспечение равномерного распределения температуры в объеме нагреваемой среды. В противном случае происходит выпадение осадка и пригорание обрабатываемой среды, карамелизация сахаров (карамелизация глюкозы – 150 °С, фруктозы – 100 °С), денатурация белков, отложение молочного

камня на КПТ и пр. Наиболее перспективным в этом случае является объемный ввод электрической энергии в обрабатываемый материал [10, с. 52]. При этом прямое воздействие электрического тока не должно оказывать на обрабатываемый материал (среду) отрицательное влияние [11, с. 15–20; 12, с. 308–312; 13, с. 496–498]. Прямой нагрев пожаробезопасен, что особенно важно при проведении термообработки в пожароопасных условиях и при термообработке горючих веществ, например, пчелиного воска [14, с. 23; 15, с. 35]. В отдельных случаях объемный ввод электрической энергии в обрабатываемый материал позволяет изменить технологический процесс нагрева. Например, электродный нагрев картофеля позволяет снизить конечную температуру обработки на 20 °С...30 °С [16].

1.2 Современные технические средства электродного электронагрева термолабильных сред и предъявляемые к ним технические требования

ЭЭН применяется для нагрева токопроводящих сред, обладающих ионной проводимостью: воды, молока, соков, кормов, меласы, почвы, бетона и т. п. Обрабатываемый материал нагревается электрическим током, протекающим между токоподводящими электродами. В настоящее время электротепловая обработка различных токопроводящих сред находит широкое применение в промышленности и с.-х. В сравнении с другими видами нагрева она имеет ряд существенных преимуществ. ЭНУ менее взрыво- и пожароопасны, требуют значительно меньших затрат на обслуживание, имеют высокий КПД, незаменимы там, где требуются высокая культура производства, точность поддержания температуры и быстроедействие.

Классификация используемых в настоящее время электродных нагревателей [1, с. 47; 3, с. 23] по основным признакам представлена на рис. 1.1. Переменный ток промышленной частоты является наиболее распространенным и доступным видом электрической энергии. Наибольшее распространение в СХП получил электродный нагрев в водогрейных и паровых котлах [17; 18; 19; 20; 21].

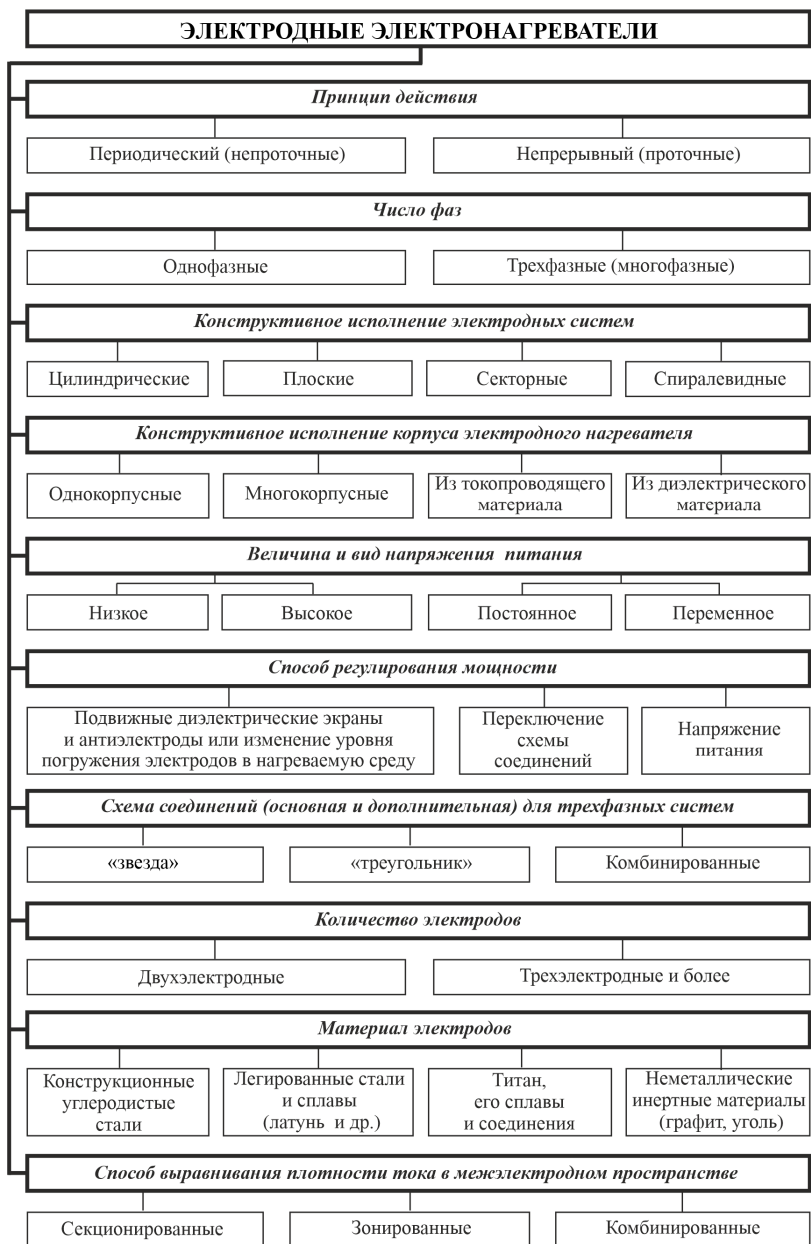


Рис. 1.1. Классификация электродных нагревателей по основным признакам

Электродный нагрев также применяется для обработки пищевых продуктов [22, с. 9–15; 23, с. 1–18; 24], в том числе вязких молочных продуктов [25] и мясных изделий [26]; широко используется для обработки кормов [27, с. 92–97; 28; 29; 30; 31] и их обеззараживания [32; 33; 34]. К электродным электронагревателям в этих технологических процессах предъявляются следующие требования:

- равномерность электрического и температурного полей в объеме обрабатываемой среды;
- нагрев при значениях плотности тока, не превышающих допустимых;
- надежный электрический контакт токоподводящих электродов с обрабатываемой средой;
- возможность периодического обслуживания (осмотр, очистка, ремонт и замена электродов);
- механические и электрохимические свойства материала электродов должны обеспечивать необходимое качество обработки среды (при допустимом значении плотности тока).

Токи средней и высокой частот используются для обработки молока, соков, вин, размораживания плодов (дефростации), варки, пастеризации и обеззараживания [22, с. 9–15]. Электротеплохимическая обработка на постоянном токе используется для обработки соков [35; 36], повышения пищевой ценности соломы [37] и обеззараживания воды [38]. Электролизные процессы также используются для получения дезинфицирующих растворов [39; 40].

Распределение температурного поля в обрабатываемой среде зависит от распределения электрического поля. При этом неравномерное распределение электрического поля в межэлектродном пространстве усиливается за счет ТКС обрабатываемой среды, что приводит к еще большей неравномерности температурного поля. При быстротечности нагрева температурное поле выравнивается незначительно за счет теплообмена и конвекции, поэтому для равномерного нагрева обрабатываемой среды возможно использовать в основном плоскопараллельную электродную систему, в которой создается равномерное электрическое поле по ширине электродов.

Весьма доступной и эффективной мерой обеспечения условия равномерности распределения электрического поля, а также снижения габаритных размеров электродных нагревателей с плоскопараллельной электродной системой является их секционирование

и зонирование, т. е. параллельное, последовательное и смешанное соединение отдельных межэлектродных секций (условно разделенных) или зон обрабатываемой среды с целью получения по длине всего нагревателя предельно допустимых или заданных значений плотности тока, или напряженности электрического поля, что обеспечивает высокую равномерность нагрева среды и минимальные габаритные размеры электронагревателя [3, с. 23; 41, с. 9–11; 42, с. 17–25; 43, с. 218–223].

На практике наиболее просто проводить секционирование путем изменения расстояния между электродами, так как в данном случае имеем весьма простую электродную схему и эквивалентную электрическую схему только с параллельным соединением условно разделенных секций с термозависимым сопротивлением. Однако при нагреве сред с сильно выраженной зависимостью удельного сопротивления от температуры, например таких, как меласса, удельное сопротивление которой при нагреве от 10 °С до 50 °С изменяется в 8...9 раз [5, с. 74], потребуется практически во столько же раз изменить поперечное сечение канала протекания среды электродного нагревателя за счет изменения межэлектродного расстояния и ширины электродов, что не всегда конструктивно возможно при условии обеспечения отсутствия застойных зон в нагревателе. Поэтому в данном случае целесообразно проводить секционирование как путем изменения межэлектродного расстояния и ширины электродов, т. е. параллельного соединения секций, так и путем их последовательного соединения, т. е. создания последовательно соединенных зон [3, с. 95].

Из-за быстротечности процесса термообработки при электродном электронагреве возникают сложности в процессе управления, и обусловлены они высокой инерционностью серийно выпускаемых датчиков температуры. Поэтому особую актуальность приобретает задача разработки средств управления температурными режимами ЭЭН.

1.3 Способы регулирования режимов тепловой обработки термолабильных сред при электродном электронагреве

Автоматизация режимов тепловой обработки ЭНУ позволяет повысить качество обработки с.-х. термолабильных сред и уменьшить

расход электроэнергии. Регулирование мощности нагрева сред в электродных ЭНУ (рис. 1.2) может проводиться:

- изменением питающего напряжения [17; 44; 45; 46];
- изменением межэлектродного расстояния [18; 47; 48; 49; 50];
- изменением уровня погружения электродов в обрабатываемую среду [51; 52];

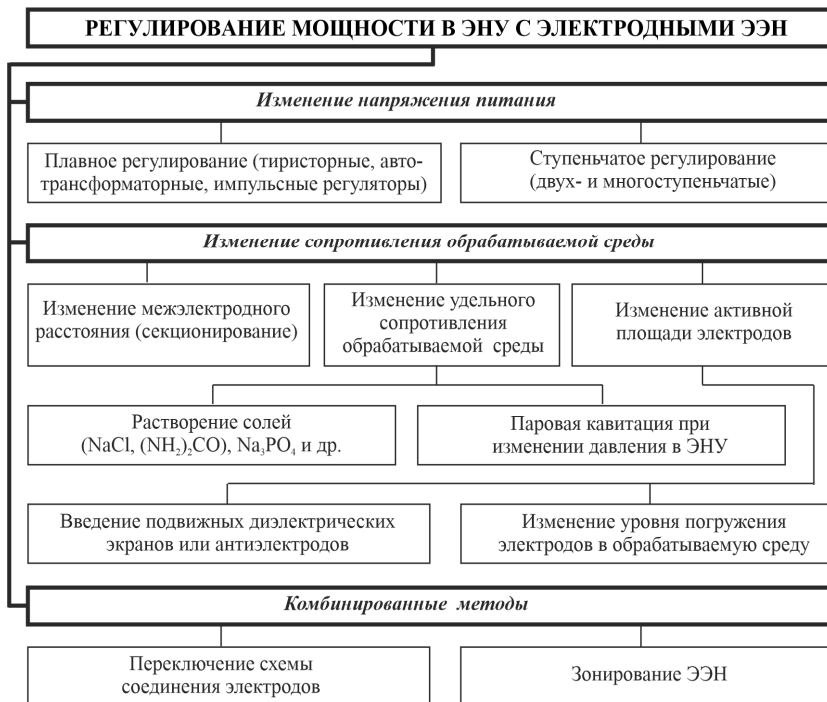


Рис. 1.2. Способы регулирования мощности нагрева в электродных ЭНУ

– введением между электродами диэлектрических экранов и антиэлектродов [53];

– изменением удельного сопротивления обрабатываемой среды путем растворения солей (NaCl , $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, Na_2PO_4 , Na_2SO_4 и др.) [55, с. 11; 6–А, с. 35–40] и управлением паровой кавитацией при изменении давления в ЭНУ [1, с. 139];

– комбинированными методами, т. е. переключением схемы соединения электродов [3, с. 23] и использованием зонирования ЭЭН

[3, с. 95–109; 7], при этом происходит перераспределение напряжения питания по зонам ЭЭН и изменение мощности нагрева обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве зон.

В зависимости от способа регулирования мощности тепловой обработки сред строятся и САР температурных режимов в ЭНУ. В соответствии с технологическими особенностями ЭНУ могут иметь различные структурные схемы: простейшие одноконтурные и сложные многоконтурные [56, с. 107–124]. В последнем случае одновременно регулируются несколько параметров, которые могут быть взаимосвязанными, например подводимая мощность и массовый расход в проточных ЭНУ.

Известно, что наибольшей точностью регулирования обладают замкнутые САР. При этом точность регулирования в основном определяется точностью и инерционностью датчика температуры [57, с. 44–47; 58, с. 5–14; 59, с. 120–127; 60]. Поэтому в ЭНУ для тепловой обработки термочувствительных сред первостепенным является вопрос выбора датчика температуры, который должен быть малоинерционным. Использование инерционных датчиков температуры приводит к необходимости применения сложных регуляторов (П-, ПИ-, ПИД-регуляторов).

Широкое распространение получили металлические и полупроводниковые термопары и терморезисторы [57, с. 38–48] как наиболее совершенные датчики температуры на современном этапе развития техники. Однако заключенные в кожух они имеют постоянную времени, которая соизмерима с инерционностью ЭЭН.

Идеальный контроль температуры по объему нагреваемой среды происходит в ЭЭН-Д, в котором нагреватель одновременно является датчиком температуры. ЭЭН-Д может выполнять функции нагревателя и датчика температуры, так как нагреваемая среда термочувствительна и существенно меняет свое сопротивление при изменении температуры, т. е. имеет значительный ТКС [61, с. 35–46; 62, с. 274–277; 63, с. 121–122].

Контроль температуры в ЭЭН-Д можно проводить путем прямого измерения сопротивления методом нулевого или дифференциального сравнения [3, с. 105]. Для этого необходимо наличие у ЭЭН одного или нескольких дополнительных (промежуточных) электродов, а также градиента температуры в обрабатываемой среде. Градиент температурного поля в проточных ЭЭН-Д возникает за счет принудительного перемещения нагреваемой среды, в непроточных –

за счет установившейся конвекции, обусловленной различной плотностью обрабатываемой среды при ее неравномерном нагреве.

При дифференциальном методе измерений (неуравновешенной мостовой измерительной схеме) происходит неполное уравнивание измеряемой величины. Дифференциальный метод сочетает в себе ряд признаков как метода непосредственной оценки, так и нулевого метода. Он дает достаточно точный результат для определенного разбаланса мостовой измерительной схемы.

Подводя итог, можно констатировать:

- большинство тепловых процессов СХП являются низкотемпературными. Использование электродного электронагрева возможно во многих процессах. Применение традиционной элементной базы на основе протяженных металлических ЭН в ЭНУ вызывает техническое противоречие между низкой температурой нагрева обрабатываемой среды и высокой температурой теплогенерирующих элементов. При их использовании необходимо применять промежуточные теплоносители, что снижает энергоэффективность ЭНУ. Использование ЭЭН создает ряд технических сложностей, связанных с большой неравномерностью нагрева, изменяющейся по длине (высоте) ЭЭН и зависящей от изменения температуры обрабатываемой среды [11, с. 15–20; 12, с. 308–312; 13, с. 496–498; 41, с. 9–11].

- используемые для обработки термолабильных сред ЭЭН должны обеспечивать: нагрев при значениях плотности тока, не превышающих допустимые; надежный электрический контакт токоподводящих электродов с обрабатываемой средой; возможность периодического обслуживания (осмотр, очистка, ремонт и замена электродов); механические и электрохимические свойства материала электродов должны обеспечивать необходимое качество обработки среды (при допустимом значении плотности тока) [10, с. 52; 11, с. 15–20; 14, с. 23];

- при быстротечности процессов термообработки термолабильных сред для упрощения САР регулирования температуры ЭЭН необходимо использовать малоинерционные датчики температуры или ЭЭН-Д, в которых в качестве термочувствительного элемента используется термозависимое сопротивление нагреваемой среды. При этом измерение ее сопротивления наиболее просто и с высокой точностью можно производить методом нулевого или дифференциального сравнения. Для этого ЭЭН-Д должен иметь один или несколько дополнительных (промежуточных) электродов и градиент температуры в обрабатываемой среде [11, с. 15–20; 62, с. 274–277; 63, с. 121–122].

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

2.1 Теоретические предпосылки для совершенствования электродных электронагревателей

Важным достоинством прямого электронагрева являются его высокий КПД и отсутствие аварийных режимов работы. Это сочетается с простотой конструкции и относительно невысокой стоимостью ЭЭНУ, что предполагает широкое использование электродного нагрева для электротепловой обработки различных сред. Однако из-за нестабильности электрических свойств обрабатываемой среды, в частности электрического сопротивления или проводимости, необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению равномерности нагрева, что усложняет расчет, конструкцию и эксплуатацию таких установок.

Электродный нагрев применяют для нагрева электропроводящих материалов, обладающих ионной проводимостью. По принципу действия электродный нагрев относится к прямому, так как сам материал является средой, в которой электрическая энергия превращается в тепловую. Электроды служат лишь для подвода электрического тока к нагреваемому материалу.

Удельное электрическое сопротивление ρ_t для слабых растворов электролитов (обрабатываемой среды) описывается гиперболической функцией от температуры [1, с. 41]:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha_T (\theta_c - 20)}, \quad (2.1)$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С, Ом·м;

α_T – температурный коэффициент, отражающий относительное уменьшение электрического сопротивления при возрастании значения температуры на 1 °С, °С⁻¹;

θ_c – температура нагрева электролита (обрабатываемой среды), °C.

Для нормальной и безаварийной работы ЭЭН необходимо контролировать и поддерживать на заданном уровне плотность тока на электродах и напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве. С уменьшением удельного электрического сопротивления нагреваемой среды, по сравнению с расчетным, появляются зоны с повышенной напряженностью поля и плотностью тока. При этом увеличивается интенсивность газовыделения, образования отложений и эрозии электродов, возрастает возможность пробоя межэлектродного пространства и электролиза обрабатываемой среды, что приводит к нестабильной работе ЭЭН.

В системах с цилиндрическими электродами напряженность электрического поля и плотность тока в поперечном сечении межэлектродного пространства не остается постоянной. В системах с плоскопараллельными электродами электрическое поле однородно по ширине электродов. При этом создаются наиболее благоприятные условия для нормальной работы электродных аппаратов. Фактическая напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве E и плотность тока на электродах не должны превышать допустимых значений по условиям возможного пробоя межэлектродного пространства и электролиза обрабатываемой среды [1, с. 48].

$$E = U / H, \quad (2.2)$$

где U – напряжение питания, В;

H – межэлектродное расстояние электронагревателя, м.

Допустимая плотность тока (A/m^2) на электродах [1, с. 49]:

$$J_{\text{доп}} = E_{\text{доп}} / \rho_t, \quad (2.3)$$

где $E_{\text{доп}}$ – допустимая напряженность электрического поля, В/м;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды.

Корма являются наиболее широко используемым в тепловой обработке термолабильным продуктом с выраженной зависимостью

удельного сопротивления от температуры. Их подвергают термообработке (варке и запариванию) для улучшения усвояемости. При термообработке кормов, основанной на принципе внешнего теплоподвода энергии, теплота внутри материала распространяется за счет его теплопроводности и массопереноса. Так как теплопроводность с.-х. продуктов, как правило, мала, и массоперенос затруднен из-за высокой их вязкости, то процесс обработки длителен. Кроме того, из-за малой теплопроводности продукты нагреваются неравномерно, что приводит к перегреву части корма. По причине длительности и неравномерности нагрева теряются питательные вещества, и повышается расход энергии на обработку.

Обработка кормов в ЭЭН возможна лишь в том случае, если электрическое поле в обрабатываемой среде равномерное, между электродами и обрабатываемой средой надежный контакт и высокая эрозионная устойчивость электродов. При этом следует учитывать, что их физические свойства зависят от температуры, степени измельчения, напряженности электрического поля и влажности. В проводимых расчетах эти свойства учитываются изменением удельной проводимости в зависимости от температуры.

Изменение проводимости при низкотемпературном нагреве описывается, как правило, линейной зависимостью [1, с. 41]:

$$\gamma = \gamma_{20}(1 + \alpha_T(\theta_c - 20)), \quad (2.4)$$

где γ_{20} – проводимость обрабатываемой среды при 20 °С, (Ом·м)⁻¹;
 θ_c – температура обрабатываемой среды, °С.

Удельная проводимость и ТКП различных кормовых материалов [64, с. 92–97] представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Удельная проводимость и ТКП кормовых материалов

Вид корма	Удельная проводимость $\gamma_{20}, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	ТКП $\alpha_T, 1/^{\circ}\text{C}$
Корнеплоды	0,43	0,021
Измельченный сырой картофель	0,64	0,018

Вид корма	Удельная проводимость γ_{20° (Ом·м) ⁻¹	ТКП α_T , 1/°С
Измельченный люпин	0,30	0,019
Измельченная вика	0,62	0,018
Измельченная, увлажненная и уплотненная солома	0,42	0,006
Зерновая барда	0,19	0,008
Картофельная барда	0,27	0,017
Сыворотка сладкая	0,75	0,031
Заменитель молока	0,61	0,032
Заменитель обрат	0,52	0,031
Заменитель пахты	0,39	0,032
Кровь свиная	0,36	0,083
Субпродукты говяжьи	0,24	0,048
Крупная рыба	0,77	0,021
Мелкая рыба	0,96	0,018
Яичный меланж	0,54	0,026

Проведенный анализ удельной проводимости и ТКП обрабатываемых сред показывает, что при их нагреве даже до 100 °С их удельная проводимость будет существенно изменяться в 2...8 раз. Это обстоятельство приводит к нестабильности процесса термообработки среды, значительному повышению мощности ЭЭН в процессе нагрева, а также увеличению материалоемкости ЭНУ. Для устранения указанных недостатков при расчете и конструировании ЭЭН необходимо принимать соответствующие меры, например, использовать секционирование и зонирование электродных систем ЭЭН.

2.2 Математические модели основных электротепловых схем электродных электронагревателей

2.2.1 Проточные электродные электронагреватели

Электротепловая схема проточного ЭЭН, выполненного в виде двух параллельных электродов, является наиболее простой. Общий

вид электротепловой схемы проточного ЭЭН с плоскопараллельными электродами изображен на рис. 2.1. Эта электротепловая схема может быть выполнена в виде корпуса прямоугольного сечения с отверстиями в противоположных плоскостях для прохождения среды. Проточный ЭЭН содержит два параллельно расположенных электрода, размещенных вдоль канала для протекания среды на внутренних боковых стенках корпуса. Эта конструкция электронагревателя применяется для нагрева текучих токопроводящих сред, обработки и запаривания кормов [30].

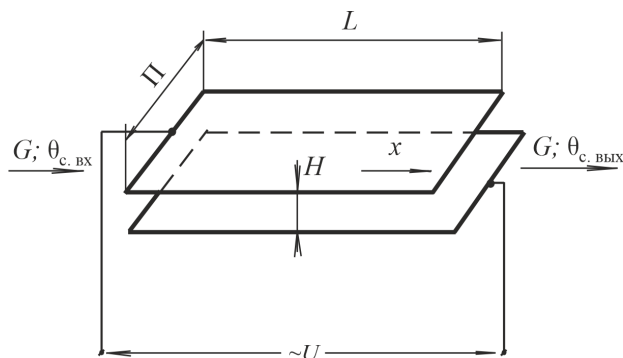


Рис. 2.1. ЭТС проточного ЭЭН с плоскопараллельными электродами

Особенностью ЭТС проточного ЭЭН является изменение температуры обрабатываемой среды как по длине ЭЭН, так и во времени. Поэтому электротепловые процессы, происходящие в ней во времени по длине описываются дифференциальным уравнением в частных производных [42, с. 17–25]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H \cdot \Pi \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H}, \quad (2.5)$$

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

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

H – межэлектродное расстояние, м;

Π – ширина электродов электронагревателя, м;

θ_c – температура обрабатываемой среды, °С;

G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;
 τ – переменная по времени нагрева, с;
 x – текущая координата длины ЭЭН, м;
 η – коэффициент полезного действия, о. е.;
 ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м.

При выраженной зависимости удельного сопротивления ρ_t от температуры θ_c такая электротепловая схема ЭЭН будет иметь большие габариты и материалоемкость потому, что межэлектродное расстояние H будет определяться допустимой плотностью тока $J_{\text{доп}}$ на выходе ЭЭН при максимальной температуре, что занижает плотность тока и соответственно, мощность нагрева по всей длине нагревателя. В этом случае для уменьшения габарита и материалоемкости ЭЭН может использоваться секционированная электротепловая схема проточного ЭЭН.

Электротепловая схема проточного ЭЭН с секционированной системой электродов (переменным сечением межэлектродного пространства) изображена на рис. 2.2, и применяется эта электротепловая схема при нагреве текучих термолабильных сред [11; 18; 47].

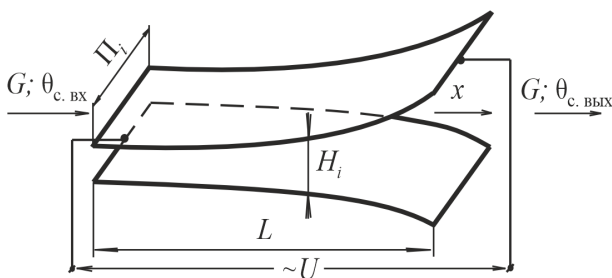


Рис. 2.2. ЭТС проточного ЭЭН с секционированной системой электродов

Электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН в одномерном пространстве, вдоль канала протекания среды и во времени, описываются следующим дифференциальным уравнением [42, с. 17–25]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H_i \cdot \Pi_i \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_i}, \quad (2.6)$$

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

Π_i – ширина электродов на i -й секции электронагревателя, м.

Однако использование секционирования электродной системы при выраженной зависимости удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры приводит к значительному изменению сечения межэлектродного пространства ЭЭН, что усложняет конструктивную компоновку ЭНУ из-за возникновения застойных зон при протекании обрабатываемой среды. Для исключения застойных зон обрабатываемой среды в ЭНУ целесообразно использовать зонирование или зонирование и секционирование одновременно. Под зонированием будем понимать последовательное соединение заполненных обрабатываемой средой межэлектродных пространств ЭЭН при постоянном его сечении по длине каждой зоны, под зонированием и секционированием одновременно – последовательное соединение заполненных обрабатываемой средой межэлектродных пространств при переменном сечении зон. При зонированной системе электродов ЭЭН может одновременно выполнять функции датчика, если параллельно ему присоединить два последовательно соединенных резистора, т. е. построить измерительный мост, в измерительную диагональ которого, между дополнительным электродом и общей точкой последовательно соединенных резисторов, включить чувствительный элемент САР. В этом случае ЭЭН будет выполнять уже функции ЭЭН-Д.

Электротепловая схема многозонного проточного ЭЭН-Д с плоскопараллельными электродами изображена на рис. 2.3, *а* и *б* [14, с. 23–28].

Зонирование технически выполняется сложнее, чем секционирование, но оно обеспечивает возможность создания заданного распределения плотности тока в обрабатываемой среде при постоянном или меньшем изменении поперечного сечения межэлектродного пространства. Постоянное межэлектродное пространство, или малое его изменение, необходимо при нагреве вязких обрабатываемых сред. Для описания электротепловых процессов, происходящих в ЭЭН-Д, уравнение (2.5) запишется для конкретной k -й зоны.

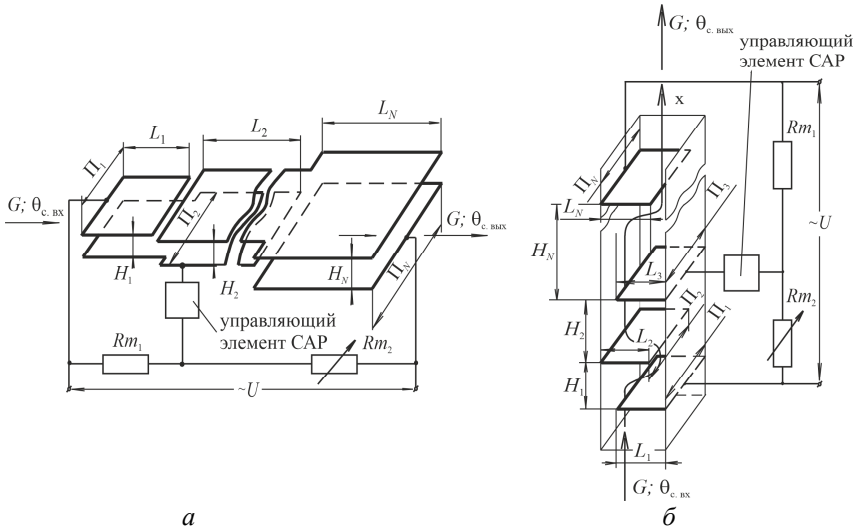


Рис. 2.3. ЭТС проточного многозонного ЭЭН-Д с размещением электродов параллельно направлению протекания обрабатываемой среды (а) и с размещением электродов перпендикулярно направлению протекания обрабатываемой среды (б)

Кроме того, записывается уравнение, описывающее текущее значение тока электронагревателя, и уравнения, которые описывают электрическую связь между последовательно соединенными зонами [10, с. 52–55; 14, с. 23–28; 42, с. 17–25; 43, с. 218–223].

$$\begin{cases}
 C_p \cdot \rho_c \cdot H \cdot \Pi \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U_k^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H}; \\
 U = \sum_{k=1}^N U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \\
 I = U / R; \\
 R = \sum_{k=1}^N R_k; \\
 R_k = \int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H dx / \left(\int_0^{L_k} \Pi dx \cdot L_k^2 \right),
 \end{cases} \quad (2.7)$$

где U_k – напряжение на k -й последовательно соединенной зоне, В;
 N – количество последовательно соединенных зон электронагревателя;
 I – текущее суммарное значение тока электронагревателя, А;
 R_k – текущее значение сопротивления k -й зоны, Ом;
 R – текущее суммарное значение сопротивления электронагревателя, Ом;
 L_k – длина k -й зоны электронагревателя, м.

2.2.2 Непроточные электродные электронагреватели с плоскопараллельной электродной системой

Электротепловая схема электродного ЭН, выполненного в виде двух параллельных электродов, погруженных в емкость с обрабатываемой средой, является достаточно простой. Общий вид непроточного электродного электронагревателя с плоскопараллельной электродной системой изображен на рис. 2.4 а) и б). При этом электроды в ЭН могут располагаться как горизонтально, так и вертикально, а также под наклоном. Широкое применение эта конструкция нашла в устройствах периодического действия, при подогреве воды и производстве пара [1, с. 133–142]. Она используется также при нагреве и запарке пищевых продуктов и кормов [25; 26].

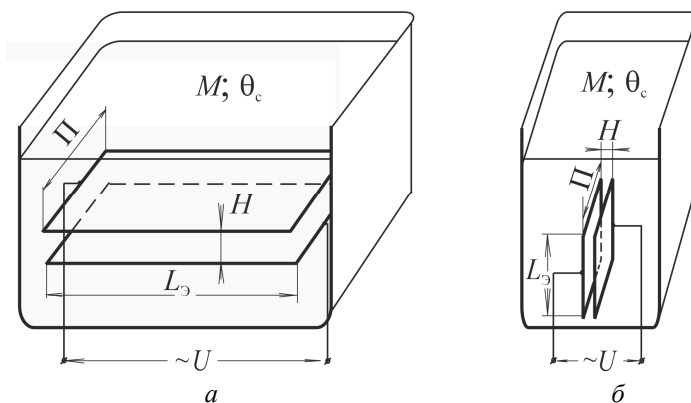


Рис. 2.4. ЭТС непроточного ЭН с плоскопараллельной электродной системой с горизонтальным размещением электродов (а) и с вертикальным размещением электродов (б)

Несмотря на различные исполнения этой ЭТС, общим у них можно считать то, что температура обрабатываемой среды в процессе нагрева изменяется во времени. Тогда электротепловые процессы, происходящие в ней, при равномерной температуре обрабатываемой среды в емкости описываются дифференциальным уравнением

$$C_p \cdot M \frac{d\theta_c}{d\tau} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot L_{\text{э}}}{\rho_t(\theta_c) \cdot H} - k \cdot F(\theta_c - \theta_{\text{вс}}), \quad (2.8)$$

где M – масса обрабатываемой среды, кг;

$\theta_{\text{вс}}$ – температура окружающей среды, °C;

$L_{\text{э}}$ – длина электродов электронагревателя, м;

k – коэффициент теплоотдачи ЭНУ в окружающую среду, Вт/(м²·°C);

F – площадь поверхности теплоотдачи ЭНУ, м².

Моделирование непроточного ЭЭН с зонированной системой электродов имеет ряд особенностей [14, с. 23–28; 41, с. 9–11]. Электротепловая схема ЭЭН-Д с зонированной системой электродов, погруженных в емкость с обрабатываемой средой, изображена на рис. 2.5. ЭЭН-Д содержит два основных токоподводящих электрода и несколько, например шесть дополнительных (промежуточных) электродов. Между токоподводящими и дополнительными (промежуточными) электродами образуются шесть зон нагрева и пять дополнительных зон. Зоны нагрева и дополнительные зоны нагревателя чередуются, при этом зоны нагрева имеют номера 1, 3, 5, ... 11, а дополнительные зоны нагревателя имеют номера 2, 4, 6, ... 10. Эта конструкция нашла применение в устройствах периодического действия, при подогреве воды и производстве пара [65].

При нагреве температура среды изменяется во времени и по высоте электродов ЭЭН-Д за счет теплового движения жидкости естественной конвекцией, что и позволяет непроточному ЭЭН выполнять функции ЭЭН-Д. Поскольку ввод энергии в обрабатываемую среду проводится объемно, т. е. практически равномерно, то в основных шести зонах нагревателя (1, 3, 5, 7, 9, 11-й) температуру по секциям нагрева этих зон можно принять одинаковой (рис. 2.6). Некоторое отличие нагрева обрабатываемой среды наблюдается

в 6-й зоне нагревателя ввиду относительной близости основных токоподводящих электродов из-за значительной разности потенциалов на них. В остальных четырех дополнительных зонах (2, 4, 8, 10-й) незначительным нагревом можно пренебречь, поскольку разница потенциалов на дополнительных (промежуточных) электродах, (например, на 1-м и 2-м дополнительных (промежуточных) электродах для 2-й дополнительной зоны нагревателя, на 2-м и 3-м дополнительных (промежуточных) электродах для 4-й дополнительной зоны нагревателя и т. д.) в десятки раз ниже, чем на основных токоподводящих электродах (см. рис. 2.6). Следовательно, для учета указанной неравномерности необходимо описывать двухмерное распределение электрического поля на 6-й зоне.

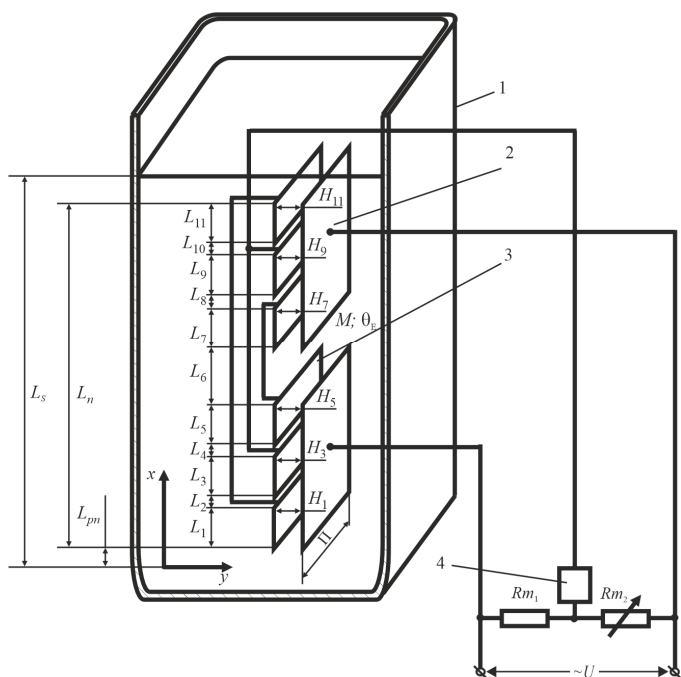


Рис. 2.5. ЭТС непрямого ЭЭН-Д

с зонированной плоскопараллельной электродной системой:

1 – емкость; 2 – электроды основные токоподводящие;

3 – электроды дополнительные (промежуточные); 4 – управляющий элемент САР;

Rm_1 , Rm_2 – сопротивления измерительного моста термонеинзависимые

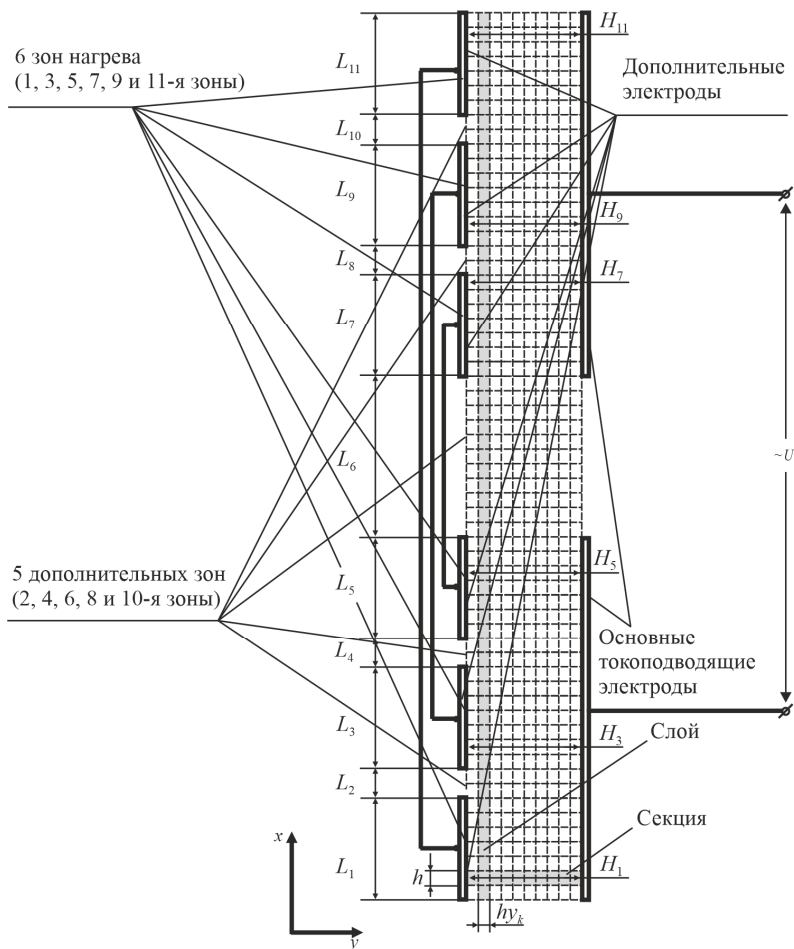


Рис. 2.6. Расчетная ЭТС непроточного ЭЭН-Д
с зонированной плоскопараллельной электродной системой

Нагрев обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д во времени и по высоте электродов описывается следующим уравнением [66, с. 15]:

$$C_p \cdot \rho_c \left(\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v_{sk} \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = q_k, \quad (2.9)$$

где v_{sk} – среднеинтегральная скорость обрабатываемой среды на k -й зоне нагрева, м/с;

q_k – мощность тепловыделения в единичном объеме межэлектродного пространства k -й зоны, Вт/м³.

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

$$q_k = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{R(\theta_c) \cdot V_{e\,mn\,k}}, \quad (2.10)$$

где $R(\theta_c)$ – сопротивление единичного объема межэлектродного пространства для k -й зоны нагрева (1, 3, 5, 7, 9 и 11-я зоны), Ом;

$V_{e\,mn\,k}$ – единичный объем межэлектродного пространства для k -й зоны нагрева (1, 3, 5, 7, 9 и 11-я зоны), м³.

Сопротивление единичного объема межэлектродного пространства для k -й зоны нагрева (1, 3, 5, 7, 9 и 11-я зоны) определяется по формуле

$$R(\theta_c) = \frac{\rho_t(\theta_c) \cdot H_k}{\Pi_k \cdot h}, \quad (2.11)$$

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

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

h – длина элементарной секции, м.

Единичный объем межэлектродного пространства для k -й зоны нагрева (1, 3, 5, 7, 9 и 11-я зоны) определяется по формуле

$$V_{e\,mn\,k} = H_k \cdot \Pi_k \cdot h. \quad (2.12)$$

Тогда уравнение (2.10) с учетом формул (2.11) и (2.12) примет следующий вид:

$$q_k = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_k^2}. \quad (2.13)$$

Так как разность потенциалов между электродами 1, 3, 5 и 7, 9, 11 нагревателя незначительна, то нагревом в зонах 2, 4 и 8, 10 можно пренебречь:

$$q_k = 0. \quad (2.14)$$

В 6-й зоне нагревателя имеется значительная разность потенциалов между основными токоподводящими электродами, следовательно, плотность тепловыделения в единичном объеме

$$q_6 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \eta}{\rho_t(\theta_c)} = \frac{(\nabla \varphi)^2 \eta}{\rho_t(\theta_c)}, \quad (2.15)$$

где φ – потенциал электрического поля обрабатываемой среды, В;
 y – текущая координата межэлектродного расстояния нагревателя, м;

η – коэффициент полезного действия, о. е.;

∇ – оператор Гамильтона (оператор набла).

Распределение потенциалов электрического поля на 6-й зоне нагрева опишется следующим уравнением:

$$\nabla \left\{ (\rho_t(\theta_c))^{-1} \cdot \nabla \varphi \right\} = 0, \quad (2.16)$$

или, обозначив $(\rho_t(\theta_c))^{-1} = \gamma$, получим:

$$\nabla \{ \gamma \cdot \nabla \varphi \} = 0. \quad (2.17)$$

Тогда на основании уравнения (2.17) для двумерного пространства в координатах x и y :

$$\frac{\partial \gamma}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \gamma}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (2.18)$$

Общее напряжение питания ЭЭН-Д равно сумме напряжений на зонах:

$$U = U_1 + U_{11} = U_3 + U_9 = U_5 + U_7, \quad (2.19)$$

где $U_1, U_3, \dots, U_{11}$ – напряжение на 1, 3, ..., 11-й зонах нагрева.

Мощность нагревателя является суммой мощностей, выделяемых в основных зонах нагрева 1, 3, 5, 7, 9, 11-й, и мощности, выделяемой в 6-й зоне нагрева:

$$P = P_0 + P_6, \quad (2.20)$$

где P_0 – мощность нагревателя, выделяемая в основных зонах нагрева (1, 3, 5, 7, 9, 11-я), Вт;

P_6 – мощность нагревателя, выделяемая в 6-й зоне нагрева, Вт.

Тогда мощность, выделяемая в 6-й зоне нагревателя, рассчитывается по формуле

$$P_6 = \Pi_6 \int_0^{L_6} \int_0^{H_6} \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \eta}{\rho_t(\theta_c)} dx dy, \quad (2.21)$$

где Π_6 – ширина 6-й зоны нагревателя, м;

L_6 – расстояние по оси x в 6-й зоне нагревателя, м;

H_6 – расстояние по оси y в 6-й зоне нагревателя, м.

Мощность в основных зонах нагрева (1, 3, 5, 7, 9, 11-я):

$$P_0 = U^2 / R. \quad (2.22)$$

Общее сопротивление ЭЭН-Д определяется по формуле

$$R = \frac{1}{(1 / (R_1 + R_{11})) + (1 / (R_3 + R_9)) + (1 / (R_5 + R_7))}, \quad (2.23)$$

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

Для основных зон (1, 3, 5, 7, 9, 11-я) сопротивление k -зоны нагревателя

$$R_k = \frac{1}{\int_0^{L_k} \frac{\Pi_k}{H_k \cdot \rho_t(\theta_c)} dx}, \quad (2.24)$$

где L_k – длина электродов на k -й зоне нагрева, м.

На обрабатываемую среду в межэлектродном пространстве k -й зоны при нагреве будет действовать подъемная сила F_{V_k} , которая вызывает тепловое движение среды и рассчитывается по формуле

$$F_{V_k} = V_{Sk} \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot g (\theta_{nn} - \theta_{si}), \quad (2.25)$$

где V_{Sk} – единичный объем слоя нагретой обрабатываемой среды в k -й зоне, м³;

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

g – ускорение свободного падения, м/с²;

θ_{nn} – температура среды над нагревателем, °C;

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

Единичный объем V_{Sk} слоя нагретой обрабатываемой среды по оси x в k -й зоне рассчитывается по формуле

$$V_{Sk} = \Pi_k \cdot hy_k \cdot L_k, \quad (2.26)$$

где hy_k – толщина элементарного слоя обрабатываемой среды в k -й зоне нагрева, м.

Так же на обрабатываемую среду в межэлектродном пространстве k -й зоны будет действовать сила F_{Tk} , препятствующая тепловому движению, которая зависит от вязкости среды и рассчитывается по формуле

$$F_{Tk} = \mu \frac{\Delta v_k}{hy_k} S_{ek}, \quad (2.27)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па · с;

Δv_k – изменение скорости слоя обрабатываемой среды на k -й зоне нагрева, м/с;

S_{ek} – площадь слоя (параллельного электродам) единичного объема нагретой обрабатываемой среды k -й зоны, м².

Площадь слоя (параллельного электродам) единичного объема нагретой обрабатываемой среды k -й зоны S_{ek} рассчитывается по формуле

$$S_{ek} = \Pi_k \cdot L_k. \quad (2.28)$$

Приравняв выражения (2.25) и (2.27), получим:

$$\mu \frac{\Delta v_k}{hy_k} S_{ek} = V_{Sk} \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot g (\theta_{nn} - \theta_{si}). \quad (2.29)$$

Сократив в формуле (2.29) S_{ek} и выполнив необходимые преобразования, получим в дифференциальной форме

$$\frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot g (\theta_{nn} - \theta_{si}). \quad (2.30)$$

Изменение скорости теплового движения обрабатываемой среды во времени по оси x в межэлектродном пространстве, зависящее

от ее коэффициента теплового расширения, рассчитывается по формуле

$$v_k = \beta \cdot g \int (\theta_{nn} - \theta_{si}) dt. \quad (2.31)$$

Продифференцировав уравнение (2.31), получим

$$\frac{dv_k}{d\tau} = \beta \cdot g (\theta_{nn} - \theta_{si}). \quad (2.32)$$

Тогда, по аналогии с [67, с. 194; 68, с. 61–68], уравнение, описывающее скорость теплового движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, с учетом формул (2.30) и (2.32) примет следующий вид:

$$\frac{\partial v_k}{\partial \tau} - \frac{\mu}{\rho_c} \cdot \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} = \beta \cdot g (\theta_{nn} - \theta_{si}). \quad (2.33)$$

Среднеинтегральная скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве по оси x в k -й зоне нагрева

$$v_{Sk} = \frac{1}{Js} \sum_{j=1}^{Js} v_{kj}, \quad (2.34)$$

где Js – количество слоев по оси y в каждой секции.

Изменение во времени температуры среды в емкости над нагревателем вычисляется по формуле

$$\theta_{nn} = \theta_{cn} + \int_0^{\tau_p} \frac{\Delta \theta_v \cdot v_{SKz} \cdot \Pi_{Kz} \cdot H_{Kz} \cdot \rho_c}{M_{nn}} d\tau, \quad (2.35)$$

где θ_{cn} – начальная температура обрабатываемой среды, °C;

τ_p – время нагрева, с;

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

θ_{cn} – начальная температура обрабатываемой среды, °С;

v_{SKz} – среднеинтегральная скорость обрабатываемой среды на выходе из ЭЭН-Д, м/с;

Π_{Kz} – ширина электродов на выходе из ЭЭН-Д, м;

H_{Kz} – межэлектродное расстояние на выходе из ЭЭН-Д, м;

Kz – количество зон нагрева непроточного ЭЭН-Д;

M_{nn} – масса обрабатываемой среды над нагревателем, кг.

Масса обрабатываемой среды над нагревателем для емкости с постоянным поперечным сечением:

$$M_{nn} = M \frac{L_S - L_n - L_{pn}}{L_S}, \quad (2.36)$$

где L_n – длина нагревателя, равная $\sum_{k=1}^{Kz} L_k$, м;

L_{pn} – расстояние от ЭЭН-Д до дна емкости, м;

L_S – высота уровня обрабатываемой среды в емкости, м.

Высота уровня обрабатываемой среды в емкости

$$L_S = \frac{M}{\rho_c \cdot S_{emk}}, \quad (2.37)$$

где S_{emk} – площадь поперечного сечения емкости с обрабатываемой средой, м².

Среднеинтегральная температура в межэлектродном пространстве

$$\theta_{si} = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} \theta_F dx, \quad (2.38)$$

где θ_F – температура секций ЭЭН-Д по оси x , превышающая θ_{nn} и обеспечивающая возникновение подъемной силы F_{V_k} , °С.

Скорость обрабатываемой среды в емкости вне ЭЭН-Д v_E рассчитывается по уравнению

$$v_E = v_{S1} \frac{H_1 \cdot \Pi_1}{S_{emk}}, \quad (2.39)$$

где v_{S1} – среднеинтегральная скорость обрабатываемой среды на 1-й зоне нагрева (на входе ЭЭН-Д), м/с;

H_1 – межэлектродное расстояние на 1-й зоне нагрева (на входе ЭЭН-Д), м;

Π_1 – ширина электродов на 1-й зоне нагрева (на входе ЭЭН-Д), м.

По аналогии с [67, с. 449], уравнение, описывающее распределение температуры в емкости с обрабатываемой средой вне ЭЭН-Д во времени по оси x , с учетом скорости обрабатываемой среды в емкости вне ЭЭН-Д v_E и коэффициента температуропроводности α , примет следующий вид:

$$\frac{\partial \theta_E}{\partial \tau} + v_E \frac{\partial \theta_E}{\partial x_E} - \alpha \frac{\partial^2 \theta_E}{\partial x_E^2} = 0, \quad (2.40)$$

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

x_E – текущая координата длины в емкости, м;

α – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Температура среды в текущий момент времени нагрева τ_p вне ЭЭН-Д

$$\theta_S = \theta_{cn} + \int_0^{\tau_p} \frac{P \cdot \eta}{C_P \cdot M} d\tau. \quad (2.41)$$

ИС разбаланса мостовой измерительной схемы определяется по формуле [69, с. 55]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \frac{R_3 \cdot Rm_2 - R_9 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R_{39} + R_3 \cdot R_9 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R_{39}}, \quad (2.42)$$

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

R_3, R_9 – термозависимые сопротивления мостовой измерительной схемы, Ом;

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

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

$R_{39} = R_3 + R_9$ – сумма термозависимых сопротивлений мостовой измерительной схемы, Ом.

Для теоретического исследования приведенной математической модели, содержащей дифференциальные уравнения в частных производных, целесообразно использовать численные конечно-разностные методы решения. Тогда запишем следующую конечно-разностную схему [70, с. 89–92; 71, с. 157–202] для уравнения (2.9) с учетом выражения (2.13):

$$\begin{aligned} & \frac{\theta c_{i-1(k)}^{n+1} - \theta c_{i-1(k)}^n}{2\tau} + \frac{\theta c_{i(k)}^{n+1} - \theta c_{i(k)}^n}{2\tau} + v_{Sk} \frac{\theta c_{i(k)}^n - \theta c_{i-1(k)}^n}{2h} + v_{Sk} \frac{\theta c_{i(k)}^{n+1} - \theta c_{i-1(k)}^{n+1}}{2h} = \\ & = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2\rho_t (\theta c_{i(k)}^n) H_k^2 \cdot C_p \cdot \rho_c} + \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2\rho_t (\theta c_{i-1(k)}^{n+1}) H_k^2 \cdot C_p \cdot \rho_c}, \end{aligned} \quad (2.43)$$

где $\theta c_{i(k)}^n, \theta c_{i(k)}^{n+1}$ – температура в межэлектродном пространстве на предыдущем и текущем временном слое на k -й зоне, i -й секции, °C;

$i = 1 \dots Is_k; k = 1 \dots Kz$;

Is_k – число секций в зоне k ;

τ – шаг по времени нагрева, с;

h – шаг по координате x , равный длине секции, м.

Из уравнения (2.43) выражаем температуру среды на временном слое $n+1$:

$$\theta_{c_{i(k)}}^{n+1} = \frac{2\tau \cdot F_{i(k)}^n + \left(1 + \frac{v_{Sk} \cdot \tau}{h}\right) \theta_{c_{i-1(k)}}^n + \left(1 - \frac{v_{Sk} \cdot \tau}{h}\right) \cdot (\theta_{c_{i(k)}}^n - \theta_{c_{i-1(k)}}^{n+1})}{1 + \frac{v_{Sk} \cdot \tau}{h}}, \quad (2.44)$$

где

$$F_{i(k)}^n = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2\rho_t (\theta_{c_{i(k)}}^n) H_k^2 \cdot C_p \cdot \rho_c} + \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2\rho_t (\theta_{c_{i-1(k)}}^{n+1}) H_k^2 \cdot C_p \cdot \rho_c}, \quad (2.45)$$

где $k = 1 \dots Kz$; $i = 1 \dots Is_k$.

При этом начальные условия следующие:

$$\text{при } \tau = 0 \quad \theta_{c_{i(k)}}^n = \theta_{cn}, \quad (2.46)$$

где $k = 1 \dots Kz$; $i = 0 \dots Is_k$;

$$\text{при } x = 0 \quad \theta_c = \theta_{pn}; \quad (2.47)$$

$$\theta_{c_{0(1)}}^{n+1} = \theta_{EJL-1}^{n+1}, \quad (2.48)$$

где θ_{pn} – температура обрабатываемой среды у дна емкости на входе в ЭЭН-Д, °С.

Аналогично запишем конечно-разностную схему для уравнения (2.15):

$$q_6 = \frac{(\Delta\phi_2 + 2 \cdot \Delta\phi_1)\eta}{\rho_t(\theta_c)}, \quad (2.49)$$

где

$$\Delta\varphi_2 = \left(\frac{\varphi_{i+1,j(k)} - \varphi_{i-1,j(k)}}{2h} \right)^2 + \left(\frac{\varphi_{i,j+1(k)} - \varphi_{i,j-1(k)}}{2hy_k} \right)^2;$$

$$\Delta\varphi_1 = \left(\frac{\varphi_{i+1,j(k)} - \varphi_{i-1,j(k)}}{2h} \right) \cdot \left(\frac{\varphi_{i,j+1(k)} - \varphi_{i,j-1(k)}}{2hy_k} \right),$$

где hy_k – шаг по координате y , равный толщине вертикального слоя, м;

$$k = 6; j = 1 \dots Js; i = 1 \dots Is_6.$$

Конечно-разностная схема для уравнения (2.33) следующая:

$$\begin{aligned} & \frac{v_{j(k)}^{n+1} - v_{j(k)}^n}{\tau} - \frac{\mu \cdot \sigma}{\rho_c \cdot hy_k^2} (v_{j-1(k)}^{n+1} - 2v_{j(k)}^{n+1} + v_{j+1(k)}^{n+1}) - \\ & - \frac{\mu \cdot (1 - \sigma)}{\rho_c \cdot hy_k^2} (v_{j-1(k)}^n - 2v_{j(k)}^n + v_{j+1(k)}^n) = \\ & = \beta \cdot g(\theta_{nn} - \theta_{si}), \end{aligned} \quad (2.50)$$

где $v_{j(k)}^n, v_{j(k)}^{n+1}$ – скорость в межэлектродном пространстве на k -й зоне и j -м слое на предыдущем и текущем временных слоях, м/с;

$$j = 1 \dots Js/2; k = 1 \dots Kz.$$

Для решения алгебраической системы уравнений, конечно-разностную схему (2.50) преобразуем к рекуррентной формуле, обеспечивающей построение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$v_{j-1(k)}^{n+1} - \left(2 + \frac{\rho_c \cdot hy_k^2}{\mu \cdot \tau \cdot \sigma} \right) v_{j(k)}^{n+1} + v_{j+1(k)}^{n+1} = F_{j(k)}^n; \quad (2.51)$$

$$F_{j(k)}^n = \left(\frac{2(1-\sigma)}{\sigma} - \frac{\rho_c \cdot h y_k^2}{\mu \cdot \tau \cdot \sigma} \right) v_{j(k)}^n - \frac{1-\sigma}{\sigma} (v_{j-1(k)}^n + v_{j+1(k)}^n) - \frac{\rho_c \cdot h y_k^2 \cdot \beta \cdot g}{\mu \cdot \sigma} (\theta_{nn} - \theta_{si}), \quad (2.52)$$

где σ – произвольный вещественный параметр.

При этом начальные условия при $(\tau = 0)$

$$v_{j(k)}^n = 0, \quad (2.53)$$

где $j = 0 \dots (Js/2)+1$; $k = 1 \dots Kz$.

Граничные условия по скорости в направлении y задаются в двух точках. В первой точке на границе «электрод – обрабатываемая среда» принимаем скорость равной нулю. Во второй точке, в центре потока жидкости, – изменение скорости равно нулю [71, с. 204–209; 72, с. 86–91].

При $y = 0$

$$v_{y=0} = 0. \quad (2.54)$$

При $y = H_6/2$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{y=H_6/2} = 0. \quad (2.55)$$

Так как полученные аппроксимирующие системы нелинейных уравнений являются трехдиагональными, то для их решения используем метод прогонки. Следовательно, определяем прогоночные коэффициенты для каждого из алгебраических уравнений:

при $y = 0$

$$v_{0(k)} = A_{pr\ 0(k)} \cdot v_{1(k)} + B_{pr\ 0(k)}; A_{pr\ 0(k)} = 0; B_{pr\ 0(k)} = 0; \quad (2.56)$$

$$A_{pr\ j(k)} = \frac{1}{2 + \frac{\rho_c \cdot hy_k^2}{\mu \cdot \tau \cdot \sigma} - A_{pr\ j-1(k)}}; \quad (2.57)$$

$$B_{pr\ j(k)} = (B_{pr\ j-1(k)} - F_{j(k)}^n) \cdot A_{pr\ j(k)}, \quad (2.58)$$

где $k = 1 \dots Kz$; $J = 1 \dots Js/2$.

При $y = H_6 / 2$ и $\frac{v_{j(k)}^{n+1} - v_{j-1(k)}^{n+1}}{h} = 0$ находим

$$v_{(Js/2)+1(k)}^{n+1} = \frac{B_{pr\ Js/2(k)}}{1 - A_{pr\ Js/2(k)}}. \quad (2.59)$$

Величину скорости на каждом слое j -й зоны находим из следующего уравнения:

$$v_{j(k)}^{n+1} = A_{pr\ j(k)} \cdot v_{j+1(k)}^{n+1} + B_{pr\ j(k)}, \quad (2.60)$$

где $j = 0 \dots Js/2$; $k = 1 \dots Kz$.

Конечно-разностная схема для уравнения (2.40) выглядит так:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{EL}^{n+1} - \theta_{EL}^n}{\tau} + v_E \frac{\theta_{EL}^n - \theta_{EL-1}^n}{h_E} + \frac{\alpha \cdot \sigma}{h_E^2} (\theta_{EL-1}^{n+1} - 2\theta_{EL}^{n+1} + \theta_{EL+1}^{n+1}) + \\ + \frac{\alpha (1 - \sigma)}{h_E^2} (\theta_{EL-1}^n - 2\theta_{EL}^n + \theta_{EL+1}^n) = 0, \end{aligned} \quad (2.61)$$

где h_E — шаг по координате x в емкости, м.

Для определения θ_{EL}^{n+1} требуется решение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, построенной по рекуррентной формуле (2.61):

$$\theta_{EL-1}^{n+1} + \left(\frac{h_E^2}{\alpha \cdot \sigma \cdot \tau} - 2 \right) \theta_{EL}^{n+1} + \theta_{EL+1}^{n+1} = F_L^n; \quad (2.62)$$

$$F_L^n = \frac{h_E^2 \cdot \theta_{EL}^n}{\alpha \cdot \sigma \cdot \tau} - \frac{h_E \cdot \nu_E}{\alpha \cdot \sigma} (\theta_{EL}^n - \theta_{EL-1}^n) - \frac{1-\sigma}{\sigma} (\theta_{EL-1}^n - 2\theta_{EL}^n + \theta_{EL+1}^n), \quad (2.63)$$

где $L = 1 \dots JL-1$.

При этом начальные условия (при $\tau = 0$)

$$\theta_{EL}^n = \theta_{cn}, \quad (2.64)$$

где $L = 0 \dots JL$.

Граничные условия (при $x_L = 0$)

$$\theta_{EL=0} = \theta_{nn}; \quad (2.65)$$

при $x_L = L_n$

$$\theta_{EJL} = \theta_{l,1}. \quad (2.66)$$

Аналогично для решения системы алгебраических уравнений находим прогоночные коэффициенты. При $x_L = 0$ и $\theta_{E0} = A_{PE0} \cdot \theta_{E1} + B_{PE0}$:

$$A_{PE0} = 0; \quad B_{PE0} = \theta_{nn}; \quad (2.67)$$

$$A_{PEL} = \frac{1}{2 - \frac{h_E^2}{\alpha \cdot \sigma \cdot \tau} - A_{PEL-1}}; \quad (2.68)$$

$$B_{PEL} = (B_{PEL-1} - F_L^n) A_{PEL}, \quad (2.69)$$

где $L = 1 \dots JL-1$.

При $x_L = L_n$ находим

$$\theta_{EJL}^{n+1} = \theta_{1,1}^{n+1}. \quad (2.70)$$

Распределение температуры в емкости находим из уравнения

$$\theta_{EL-1}^{n+1} = A_{PEL-1} \cdot \theta_{EL}^{n+1} + B_{PEL-1}, \quad (2.71)$$

где $L = 1 \dots JL-1$.

Конечно-разностная схема для уравнения (2.18):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\gamma_{i+1,j(k)} - \gamma_{i-1,j(k)}}{2h} \cdot \frac{\varphi_{i+1,j(k)} - \varphi_{i-1,j(k)}}{2h} \right) + \\ & + \gamma_{i,j(k)} \frac{\varphi_{i+1,j(k)} - 2 \cdot \varphi_{i,j(k)} + \varphi_{i-1,j(k)}}{h^2} + \\ & + \left(\frac{\gamma_{i,j+1(k)} - \gamma_{i,j-1(k)}}{2hy_k} \cdot \frac{\varphi_{i,j+1(k)} - \varphi_{i,j-1(k)}}{2hy_k} \right) + \\ & + \gamma_{i,j(k)} \frac{\varphi_{i,j+1(k)} - 2 \varphi_{i,j(k)} + \varphi_{i,j-1(k)}}{hy_k^2} = 0, \end{aligned} \quad (2.72)$$

где $i = 1 \dots Is_k$; $j = 1 \dots Js$; $k = 5 \dots 7$.

Для вычисления распределения потенциалов электрического поля применяем итерационный процесс, использующий дробный шаг. Тогда алгоритм численного решения разбивается на два этапа:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{i,j(k)} &= \varphi_{i,j(k)}^S + \\ & + \frac{\tau'}{2} \left(\sigma \left(Fal_{1,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) + Fal_{2,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - 2\bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) \right) + \right. \\ & + (1-\sigma) \cdot \left(Fal_{1,i,j(k)} \cdot \left(\varphi_{i+1,j(k)}^S - \varphi_{i-1,j(k)}^S \right) + Fal_{2,i,j(k)} \left(\varphi_{i+1,j(k)}^S - 2\varphi_{i,j(k)}^S + \varphi_{i-1,j(k)}^S \right) \right) + \\ & \left. + Fal_{3,i,j(k)} \left(\varphi_{i,j+1(k)}^S - \varphi_{i,j-1(k)}^S \right) + Fal_{4,i,j(k)} \left(\varphi_{i,j+1(k)}^S - 2\varphi_{i,j(k)}^S + \varphi_{i,j-1(k)}^S \right) \right); \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned}
& \varphi_{i,j(k)}^{S+1} = \bar{\varphi}_{i,j(k)} + \\
& + \frac{\tau'}{2} \left(Fal1_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) + Fal2_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - 2\bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) + \right. \\
& + \sigma \left(Fal3_{i,j(k)} \left(\varphi_{i,j+1(k)}^{S+1} - \varphi_{i,j-1(k)}^{S+1} \right) + Fal4_{i,j(k)} \left(\varphi_{i,j+1(k)}^{S+1} - 2\varphi_{i,j(k)}^{S+1} + \varphi_{i,j-1(k)}^{S+1} \right) \right) + \\
& \left. + (1-\sigma) \cdot \left(Fal3_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i,j+1(k)} - \bar{\varphi}_{i,j-1(k)} \right) + Fal4_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i,j+1(k)} - 2\bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{\varphi}_{i,j-1(k)} \right) \right) \right), \quad (2.74)
\end{aligned}$$

$$\text{где } Fal1_{i,j(k)} = \frac{\gamma_{i+1,j(k)} - \gamma_{i-1,j(k)}}{4h^2};$$

$$Fal2_{i,j(k)} = \frac{\gamma}{h^2};$$

$$Fal3_{i,j(k)} = \frac{\gamma_{i,j+1(k)} - \gamma_{i,j-1(k)}}{4hy_k^2};$$

$$Fal4_{i,j(k)} = \frac{\gamma}{hy_k^2};$$

$\bar{\varphi}_{i,j(k)}$ – потенциал на промежуточном расчетном слое;

$\varphi_{i,j(k)}^S$ – потенциал на предыдущем расчетном слое;

τ' – итерационный параметр;

$\varphi_{i,j(k)}^{S+1}$ – потенциал на текущем расчетном слое;

$k = 5 \dots 7; i = 1 \dots Is_k; j = 1 \dots Js.$

Начальные условия по γ при $\tau = 0$:

$$\gamma_{i,j(k)} = \frac{1}{\rho_t(\theta_{cn})}, \quad (2.75)$$

где $k = 5 \dots 7; i = 1 \dots Is_k; j = 1 \dots Js.$

При $k = 5; i = 1$:

$$\gamma_{1,j(5)} = \frac{1}{\rho_t(\theta_{1,j(5)})}, \quad (2.76)$$

где $j = 1 \dots Js$;

$$\theta_{1,j(5)} = \theta_{c_{1,(5)}}.$$

Начальное условие по φ (при $\tau = 0$ и при $k = 5$):

$$\varphi_{i,j(5)} = U - \frac{\left(U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta_{i,j(5)}^n) dy \right)}{\int_0^{Js} \rho_t(\theta_{i,j(5)}^n) dy}, \quad (2.77)$$

где $i = 1 \dots Is$; $j = 1 \dots Js$.

Начальное условие по φ (при $\tau = 0$ и при $k = 6$):

$$\varphi_{i,j(6)} = \frac{\left(\varphi_{0,j(6)} - \varphi_{Is6,j(6)} \right) \int_0^x \rho_t(\theta_{i,j(6)}^n) dx}{\int_0^{Is6} \rho_t(\theta_{i,j(6)}^n) dx}, \quad (2.78)$$

где $\varphi_{0,j(6)}$ – потенциал на границе 5-й и 6-й зон нагрева на j -слое;

$\varphi_{Is6,j(6)}$ – потенциал на границе 6-й и 7-й зон нагрева на j -слое.

$$i = 1 \dots Is_6; j = 1 \dots Js.$$

Начальное условие по φ (при $\tau = 0$ и при $k = 7$):

$$\varphi_{i,j(7)} = \frac{U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta_{i,j(7)}^n) dy}{\int_0^{Js} \rho_t(\theta_{i,j(7)}^n) dy}, \quad (2.79)$$

где $i = 1 \dots Is_7; j = 1 \dots Js$.

Граничное условие при $x = 0$:

$$\Phi_{0,j(5)} = U - \frac{\left(U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta_{1,j(5)}^n) dy \right)}{\int_0^{Js} \rho_t(\theta_{1,j(5)}^n) dy}. \quad (2.80)$$

Граничное условие при $x = Is_7 + 1$:

$$\Phi_{Is_7+1,j(7)} = \frac{U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta_{Is_7,j(7)}^n) dy}{\int_0^{Js} \rho_t(\theta_{Is_7,j(7)}^n) dy}. \quad (2.81)$$

Граничное условие (при $k = 5, y = 0$):

$$\Phi_{i,0(5)} = 0. \quad (2.82)$$

Граничное условие (при $k = 6, y = 0$):

$$\Phi_{i,0(k)} = \frac{\left(\Phi_{0,0(6)} - \Phi_{Is_6,0(6)} \right) \int_0^x \rho_t(\theta_{i,1(6)}^n) dx}{\int_0^{Is_6} \rho_t(\theta_{i,1(6)}^n) dx}. \quad (2.83)$$

Граничное условие (при $k = 7, y = 0$):

$$\Phi_{i,0(7)} = U. \quad (2.84)$$

Граничное условие (при $k = 5, 6, 7, y = Js+1$):

$$\varphi_{i,Js+1(k)} = U \frac{R_5}{R_5 + R_7}. \quad (2.85)$$

Для решения систем нелинейных алгебраических уравнений (2.73) и (2.74) методом прогонки преобразуем их:

$$\bar{a} \cdot \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} + \bar{b} \cdot \bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{c} \cdot \bar{\varphi}_{i+1,j(k)} = \bar{d}; \quad (2.86)$$

$$a^{S+1} \cdot \varphi_{i,j-1(k)}^{S+1} + b^{S+1} \cdot \varphi_{i,j(k)}^{S+1} + c^{S+1} \cdot \varphi_{i,j+1(k)}^{S+1} = d^{S+1}. \quad (2.87)$$

Тогда рекуррентные формулы для вычисления прогоночных коэффициентов системы уравнений (2.86) имеют вид:

$$A(\varphi^S)_{0,j(k)} = 0; \quad (2.88)$$

$$B(\varphi^S)_{0,j(5)} = U - \frac{\left(U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta_{1,j(5)}^n) dy \right)}{\int_0^{Js} \rho_t(\theta_{1,j(5)}^n) dy}; \quad (2.89)$$

$$A(\varphi^S)_{i,j(k)} = -\frac{\bar{c}}{a \cdot A(\varphi^S)_{i-1,j(k)} + \bar{b}}; \quad (2.90)$$

$$B(\varphi^S)_{i,j(k)} = \frac{\bar{d} - \bar{a} \cdot B(\varphi^S)_{i-1,j(k)}}{a \cdot A(\varphi^S)_{i-1,j(k)} + \bar{b}}, \quad (2.91)$$

где

$$\bar{a} = \frac{\tau'}{2} \sigma \left(Fal1_{i,j(k)} - Fal2_{i,j(k)} \right); \quad (2.92)$$

$$\bar{b} = 1 + \tau' \cdot \sigma \cdot Fal2_{i,j(k)}; \quad (2.93)$$

$$\bar{c} = \frac{\tau'}{2} \sigma \left(-Fal1_{i,j(k)} - Fal2_{i,j(k)} \right); \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} \bar{d} = & \varphi^S_{i,j(k)} + \\ & + \frac{\tau'}{2} \left((1-\sigma) \cdot \left(Fal1_{i,j(k)} \left(\varphi^S_{i+1,j(k)} - \varphi^S_{i-1,j(k)} \right) + Fal2_{i,j(k)} \left(\varphi^S_{i+1,j(k)} - 2\varphi^S_{i,j(k)} + \varphi^S_{i-1,j(k)} \right) \right) + \right. \\ & \left. + Fal3_{i,j(k)} \left(\varphi^S_{i,j+1(k)} - \varphi^S_{i,j-1(k)} \right) + Fal4_{i,j(k)} \left(\varphi^S_{i,j+1(k)} - 2\varphi^S_{i,j(k)} + \varphi^S_{i,j-1(k)} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.95)$$

где $k = 5 \dots 7$; $i = 1 \dots Is_k$; $j = 1 \dots Js$.

Решение $\bar{\varphi}_{i,j(k)}$ производим по формуле

$$\bar{\varphi}_{Is7+1,j(7)} = \frac{U \frac{R_5}{R_5 + R_7} \int_0^y \rho_t(\theta^n_{Is7,j(7)}) dy}{J_s \int_0^y \rho_t(\theta^n_{Is7,j(7)}) dy}; \quad (2.96)$$

$$\bar{\varphi}_{i,j(k)} = A(\varphi^S)_{i,j(k)} \cdot \bar{\varphi}_{i+1,j(k)} + B(\varphi^S)_{i,j(k)}. \quad (2.97)$$

Рекуррентные формулы для вычисления прогоночных коэффициентов системы уравнений (2.87) имеют вид:
при $k = 5$

$$A(\bar{\varphi})_{i,0(5)} = 0; \quad (2.98)$$

$$B(\bar{\varphi})_{i,0(5)} = 0; \quad (2.99)$$

при $k = 6$

$$A(\bar{\varphi})_{i,0(6)} = 0; \quad (2.100)$$

$$B(\bar{\varphi})_{i,0(6)} = \frac{\left(\varphi_{0,0j(6)} - \varphi_{Is6,0(6)} \right) \int_0^x \rho_t(\theta_{i,1(6)}^n) dx}{\int_0^{Is6} \rho_t(\theta_{i,1(6)}^n) dx}; \quad (2.101)$$

при $k = 7$

$$A(\bar{\varphi})_{i,0(7)} = 0; \quad (2.102)$$

$$B(\bar{\varphi})_{i,0(7)} = U; \quad (2.103)$$

$$A(\bar{\varphi})_{i,j(k)} = -\frac{c^{S+1}}{a^{S+1} \cdot A(\bar{\varphi})_{i,j-1(k)} + b^{S+1}}; \quad (2.104)$$

$$B(\bar{\varphi})_{i,j(k)} = \frac{d^{S+1} - a^{S+1} \cdot B(\bar{\varphi})_{i,j-1(k)}}{a^{S+1} \cdot A(\bar{\varphi})_{i,j-1(k)} + b^{S+1}}, \quad (2.105)$$

где

$$a^{S+1} = \frac{\tau'}{2} \sigma \left(Fal3_{i,j(k)} - Fal4_{i,j(k)} \right); \quad (2.106)$$

$$b^{S+1} = 1 + \tau' \cdot \sigma \cdot Fal4_{i,j(k)}; \quad (2.107)$$

$$c^{S+1} = \frac{\tau'}{2} \sigma \left(-Fal3_{i,j(k)} - Fal4_{i,j(k)} \right); \quad (2.108)$$

$$d^{S+1} = \bar{\varphi}_{i,j(k)} + \frac{\tau'}{2} \left[Fal1_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) + Fal2_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i+1,j(k)} - 2\bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{\varphi}_{i-1,j(k)} \right) + \right. \\ \left. + (1-\sigma) \cdot \left(Fal3_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i,j+1(k)} - \bar{\varphi}_{i,j-1(k)} \right) + Fal4_{i,j(k)} \left(\bar{\varphi}_{i,j+1(k)} - 2\bar{\varphi}_{i,j(k)} + \bar{\varphi}_{i,j-1(k)} \right) \right) \right], \quad (2.109)$$

где $k = 5 \dots 7$; $i = 1 \dots I_{S_k}$; $j = 1 \dots J_S$.

Решение $\varphi_{i,j(k)}^{S+1}$ определяется по формуле

$$\varphi_{i,J_{S+1}(k)}^{S+1} = U \frac{R_5}{R_5 + R_7}; \quad (2.110)$$

$$\varphi_{i,j(k)}^{S+1} = A(\bar{\varphi})_{i,j(k)} \cdot \varphi_{i,j+1(k)}^{S+1} + B(\bar{\varphi})_{i,j(k)}. \quad (2.111)$$

Итерационный процесс прекращается при выполнении следующего условия:

$$\max_{i,j(k)} \left(\frac{|\varphi_{i,j(k)}^{S+1} - \varphi_{i,j(k)}^S|}{\varphi_{i,j(k)}^{S+1}} \right) \leq \varepsilon, \quad (2.112)$$

где ε – относительная погрешность вычислений.

Рассчитанные значения потенциалов используются для определения плотности тепловыделений и мощности 6-й зоны нагрева на $n+1$ временном слое.

Блок-схема алгоритма расчета динамических характеристик не-проточного ЭЭН-Д приведена на рис. 2.7.

Обобщая вышеприведенное, очевидно, что организация процесса численного расчета динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей с зонированной системой электродов, с учетом теплового движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве является достаточно сложной задачей в связи с наличием большого количества параметров, зависящих от температуры обрабатываемой среды и требующих в процессе решения построения сложных итерационных процессов, приводящих к значительным затратам машинного времени.

В аналитическом виде решение поставленной задачи практически невозможно.

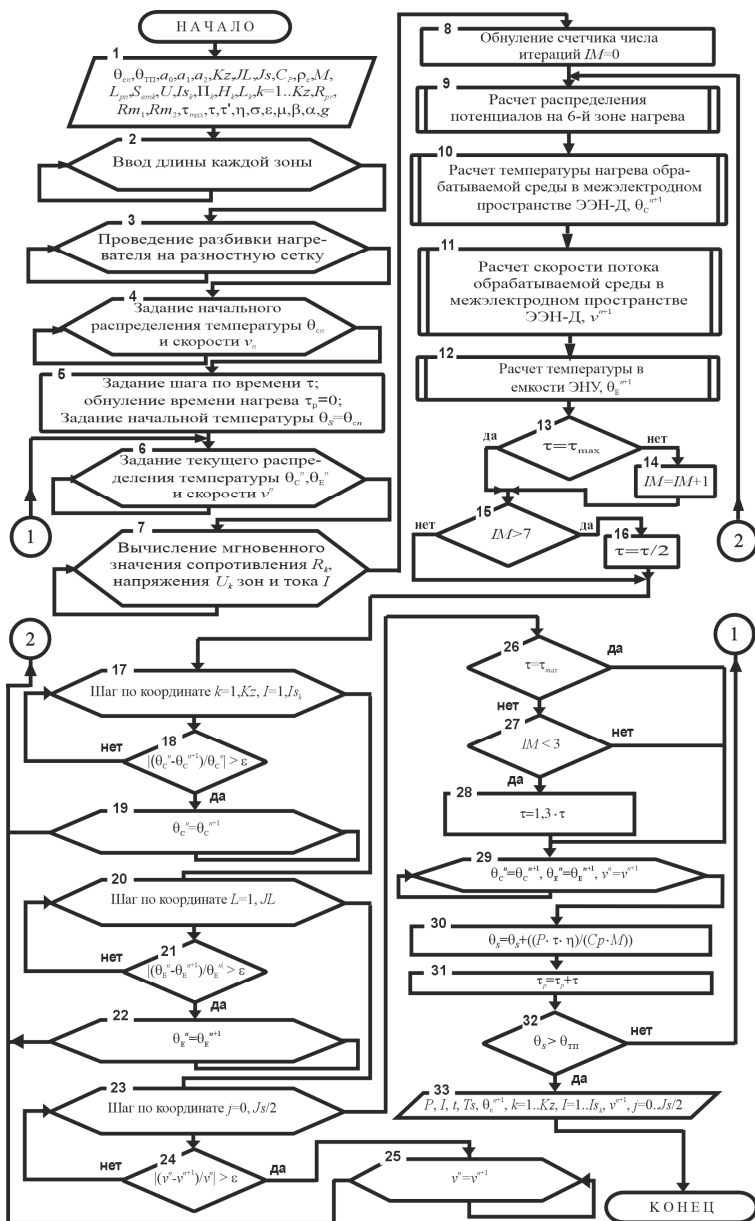


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма расчета динамических характеристик непроточного ЭНД с зонированной плоскопараллельной электродной системой

2.3 Исследование статических и динамических характеристик основных электротепловых схем электродных электронагревателей

Разработанные математические модели основных электротепловых схем ЭЭН описывают происходящие в них процессы в пространстве и во времени. Они позволяют рассчитывать статические и динамические электротепловые характеристики электродных ЭН. Однако использование таких математических моделей для расчета характеристик и конструктивных параметров электродных ЭН требует использования ЭВМ. Поэтому для упрощенных расчетов ЭЭН целесообразно иметь хотя бы статические электротепловые характеристики в аналитическом виде.

2.3.1 Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной электродной системой

Электротепловые процессы в непроточных ЭЭН описываются дифференциальным уравнением

$$C_p \cdot M \frac{d\theta_c}{d\tau} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot V}{\rho_t(\theta_c) \cdot H} - k \cdot F(\theta_c - \theta_{вс}), \quad (2.113)$$

где $\theta_{вс}$ – температура окружающей среды, °C;

V – высота электродов электронагревателя, м,

при $U = E \cdot H$ и $\rho_t(\theta_c) = 1/(\gamma_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c))$,

где γ_0 – электрическая проводимость при 0°C, (Ом·м)⁻¹;

α_{Π} – температурный коэффициент проводимости, отражающий относительное увеличение электрической проводимости при возрастании значения температуры на 1 °C, °C⁻¹;

E – напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве, В·м.

Преобразуем уравнение (2.113) к каноническому виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_c}{d\tau} + \frac{1}{C_p \cdot M} (k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V) \theta_c - \\ - \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{\text{вс}} \right) = 0, \end{aligned} \quad (2.114)$$

при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ полное решение уравнения (2.114) [3, с. 79–91; 73, с. 71–72; 74, с. 15–26; 75, с. 130–136; 76, с. 181–187].

$$\theta_c(\tau) = C \cdot e^{-\frac{1}{C_p \cdot M} (k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V) \tau} + \theta_y, \quad (2.115)$$

где C – произвольная постоянная, определяемая из начальных условий;

θ_y – установившаяся температура, представляющая собой частное решение уравнения (2.114), при $\tau \rightarrow \infty$, равная:

$$\theta_y = \frac{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{\text{вс}}}{1 - \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F}}. \quad (2.116)$$

Из уравнения (2.114) видно, что величина и знак множителя при θ_c могут меняться в зависимости от соотношения между $k \cdot F$ и $E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V$, т. е. в зависимости от теплоотдачи с поверхности ЭЭНУ и интенсивности изменения тепловыделения в обрабатываемой среде из-за ТКП.

При незначительных потерях теплоты с поверхности, большой плотности тока и относительно больших значениях γ_0 и α_{Π} могут возникать условия изменения знака неравенства, т. е. при $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_c}{d\tau} - \frac{1}{C_p \cdot M} (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V - k \cdot F) \theta_c - \\ - \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.117)$$

Тогда его полное решение:

$$\theta_c(\tau) = C \cdot e^{\frac{1}{C_p \cdot M} (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V - k \cdot F) \tau} + \theta_y, \quad (2.118)$$

где установившаяся температура θ_y , т. е. частное решение уравнения (2.117), будет определяться по следующей формуле:

$$\theta_y = - \frac{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc}}{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} - 1}. \quad (2.119)$$

Динамика процесса нагрева обрабатываемой среды будет зависеть от соотношения $k \cdot F$ и $E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V$. Начальные условия: $\tau = 0$; $\theta_c = \theta_{cn}$.

Согласно уравнению (2.115) и начальным условиям, постоянная $C = \theta_{cn} - \theta_y$. Тогда решение уравнения (2.115) при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ примет вид:

$$\begin{aligned} \theta_c(\tau) = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{1}{C_p \cdot M} (k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V) \tau} \right) + \\ + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{1}{C_p \cdot M} (k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V) \tau}. \end{aligned} \quad (2.120)$$

При незначительных потерях теплоты с поверхности ЭЭНУ при $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ согласно уравнению (2.118)

и приведенным начальным условиям постоянная $C = \theta_{cn} - \theta_y$. Тогда решение уравнения (2.118) примет вид:

$$\theta_c(\tau) = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{1}{C_p \cdot M} (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V - k \cdot F) \tau} \right) + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{1}{C_p \cdot M} (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V - k \cdot F) \tau}. \quad (2.121)$$

Исходное уравнение (2.114) при условиях теплопотерь и интенсивности изменения тепловыделения в обрабатываемой среде из-за ТКП, т. е. при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$, примет вид:

$$\frac{d\theta_c}{d\tau} - \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) = 0. \quad (2.122)$$

Тогда полное решение этого уравнения следующее:

$$\theta_c(\tau) = \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) \tau + C, \quad (2.123)$$

при $\tau = 0$ и $\theta_c = \theta_{cn}$, произвольная постоянная C будет равна начальной температуре обрабатываемой среды, т. е. $C = \theta_{cn}$.

Соответственно решение уравнения (2.123) примет вид:

$$\theta_c(\tau) = \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc} \right) \tau + \theta_{cn}. \quad (2.124)$$

Графики процесса изменения температуры, после подключения ЭЭНУ к источнику питания, для рассматриваемых вариантов представлены на рис. 2.8, из которого видно, что при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ значения температуры изменяются по экспоненте, стремясь к установившемуся значению θ_y .

При $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ значения температуры изменяются по возрастающей экспоненте, стремясь к критическим. При условиях тепловыделения, когда $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$, значения температуры также стремятся к критическим по линейной зависимости. При этом процесс нагрева протекает по прямой, проходящей под углом α к оси времени, определяемым по формуле

$$\alpha = \arctg \left(\frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{\text{вс}} \right) \right). \quad (2.125)$$

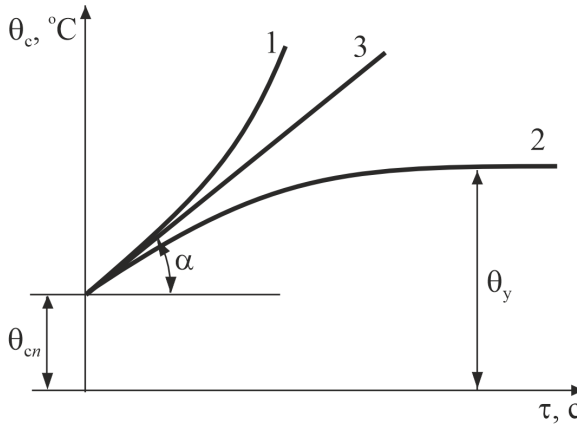


Рис. 2.8. Графики зависимости температуры обрабатываемой среды от времени нагрева при различных соотношениях теплоотдачи с поверхности ЭЭНУ и интенсивности изменения тепловыделения в обрабатываемой среде:

1 — $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$; 2 — $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$; 3 — $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$

При достижении критических значений температуры происходят процессы кипения и лавинообразного роста отложений на электродах.

Время нагрева до любой температуры получаем из соответствующих уравнений (2.120), (2.121) и (2.124). При $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ время нагрева

$$\tau = \left(\frac{C_p \cdot M}{k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot V \cdot \Pi} \right) \cdot \ln \frac{\theta_y - \theta_{\text{сн}}}{\theta_y - \theta_c}. \quad (2.126)$$

При $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ время нагрева

$$\tau = \left(\frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot V \cdot \Pi - k \cdot F} \right) \cdot \ln \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{\theta_c - \theta_y}. \quad (2.127)$$

Время нагрева при условиях, когда $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$:

$$\tau = \frac{\theta_c - \theta_{cn}}{\frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \left(\frac{E^2 \cdot \gamma_0}{k \cdot F} H \cdot V \cdot \Pi + \theta_{вс} \right)}. \quad (2.128)$$

Важным параметром при управлении процессом тепловой обработки сред является постоянная времени нагрева T и охлаждения T_o ЭЭНУ. Численно она равна отношению теплоемкости обрабатываемой среды к теплотерям ЭЭНУ с учетом изменения интенсивности тепловыделений за счет ТКП обрабатываемой среды. В уравнении (2.120) при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ постоянная времени нагрева

$$T = \frac{C_p \cdot M}{k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot V \cdot \Pi}. \quad (2.129)$$

В уравнении (2.121) при $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ постоянная времени нагрева

$$T' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot V \cdot \Pi - k \cdot F}. \quad (2.130)$$

Постоянная времени нагрева в уравнении (2.124) при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$:

$$T'' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}. \quad (2.131)$$

В начальный момент нагрева обрабатываемой среды теплотеперьями в окружающую среду можно пренебречь, т. е. принять равными нулю: $k \cdot F \cdot (\theta_c - \theta_{\text{вс}}) = 0$. Тогда уравнение (2.113) примет вид:

$$C_p \cdot M \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot V}{\rho_t(\theta_c) \cdot H}. \quad (2.132)$$

Выразим скорость изменения температуры при $U = E \cdot H$ и $\rho_t(\theta_c) = 1/(\gamma_0 \cdot (1 + \alpha_{\text{п}} \cdot \theta_c))$, тогда уравнение (2.132) примет вид:

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{C_p \cdot M} (1 + \alpha_{\text{п}} \cdot \theta_c). \quad (2.133)$$

Из полученного уравнения можно сделать вывод, что скорость изменения температуры среды для данного случая имеет линейную зависимость.

Приняв в уравнении (2.113) мощность нагрева равной нулю $P = (U^2 \cdot \Pi \cdot V) / \rho_t(\theta_c) \cdot H = 0$, получим уравнение охлаждения:

$$C_p \cdot M \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = -k \cdot F (\theta_c - \theta_{\text{ос}}). \quad (2.134)$$

После некоторых преобразований уравнения (2.134) получим:

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_c - \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{\text{вс}} = 0. \quad (2.135)$$

Полное решение этого уравнения:

$$\theta_c(\tau) = C \cdot e^{-\frac{\tau}{T_o}} + \theta_y, \quad (2.136)$$

где $T_o = \frac{C_p \cdot M}{k \cdot F}$ – постоянная времени охлаждения, с. (2.137)

Частное решение для этого случая определим из уравнения (2.135) при $\tau \rightarrow \infty$: $\theta_y = \theta_c$.

Из начального условия (при $\tau = 0$) и из уравнения (2.136), с учетом частного решения, находим произвольную постоянную $C = \theta_{cn} - \theta_{bc}$, где θ_{cn} – начальная температура обрабатываемой среды, при которой произошло отключение электронагрева, °C.

Следовательно, полное решение уравнения (2.136) будет иметь следующий вид: $\theta_c(\tau) = (\theta_{cn} - \theta_{bc})e^{-\frac{\tau}{T_o}} + \theta_{bc}$, или

$$\theta_c(\tau) = \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_o}} + \theta_{bc} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_o}} \right). \quad (2.138)$$

Скорость нагрева обрабатываемой среды при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_y - \theta_{cn}}{T} e^{-\frac{\tau}{T_o}}. \quad (2.139)$$

Скорость нагрева обрабатываемой среды при $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{T'} e^{\frac{\tau}{T_o}}. \quad (2.140)$$

Скорость нагрева обрабатываемой среды при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{bc} = \frac{1}{T''} + \frac{1}{T_o} \theta_{bc}. \quad (2.141)$$

Таким образом, скорость изменения температуры после включения напряжения питания ЭЭН для рассматриваемых вариантов различная. При $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ скорость изменения температуры уменьшается по экспоненте, стремясь к нулю при установившемся значении θ_y . При $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ скорость изменения температуры увеличивается по экспоненте, стремясь к бесконечности. При условиях, когда $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ скорость изменения температуры постоянна.

При $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ и $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$, из-за лавинообразного роста температуры обрабатываемой среды, после подачи напряжения питания на ЭЭН будет затрудняться регулирование термообработки в ЭНУ с ЭЭН, что требует применения сложных терморегуляторов (П-, ПИ-, ПИД-регуляторов).

Экспериментальные и расчетные значения температуры обрабатываемой среды (воды) при нагреве в ЭЭН с плоскопараллельными электродами характеризуемого следующими параметрами: $L_3 = 0,034$ м; $\Pi = 0,03$ м; $H = 0,006$ м; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $M = 0,2$ кг; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$; коэффициенты уравнения $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°С, приведены на рис. 2.9, а), схема лабораторной модели – на рис. 2.9, б).

Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений температуры определяется по формуле

$$\delta_{\theta} = \frac{\theta_p - \theta_3}{\theta_3} 100 \%. \quad (2.142)$$

Проведенные исследования показывают, что предложенное дифференциальное уравнение с достаточной точностью описывает электротепловые процессы, происходящие в непроточных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой. Некоторое расхождение экспериментальных и расчетных значений температуры объясняется изменением коэффициента теплоотдачи, некоторой нелинейной зависимостью удельной проводимости от температуры, а также парообразованием при повышении значений температуры воды.

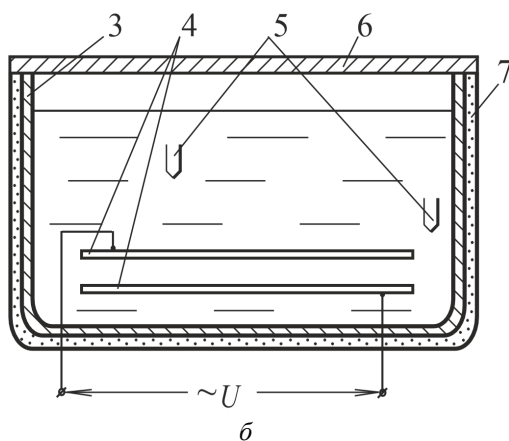
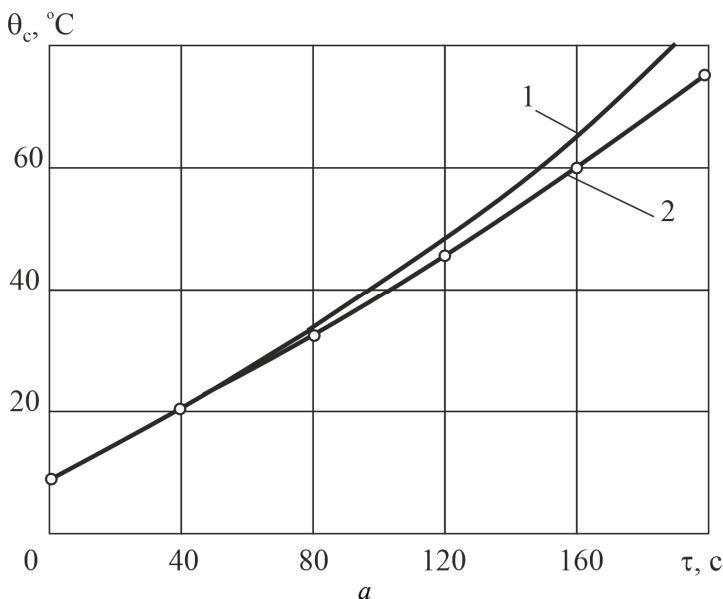


Рис. 2.9. Расчетный 1 и экспериментальный 2 и графики изменения температуры воды $\theta_c = f(\tau)$, при ее нагреве в непроточном ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (а), при $L_3 = 0,034$ м; $\Pi = 0,03$ м; $H = 0,006$ м; $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $M = 0,2$ кг; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$ и схема лабораторной модели (б):
 3 – корпус емкости; 4 – электроды плоскопараллельные; 5 – термопары;
 6 – крышка; 7 – теплоизоляция

2.3.2 Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей-датчиков с зонированной электродной системой

Электротепловые процессы, протекающие в непроточных ЭЭН-Д с зонированной системой электродов, описываются нелинейными дифференциальными и интегральными уравнениями (2.9)...(2.42). Решались они численно, методом конечных разностей. Также была проведена экспериментальная проверка полученных расчетных значений.

На рис. 2.10 приведены схема лабораторной модели непроточного ЭЭН с зонированной плоскопараллельной электродной системой. На рис. 2.11, а приведены экспериментальные и расчетные (полученные на ЭВМ) графики изменения во времени температуры воды при нагреве в непроточном ЭЭН-Д с зонированной системой электродов, характеризуемого следующими параметрами: $P = 0,07$ м; $H = 0,006$ м; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$; $L_1 = L_3 = L_5 = L_7 = L_9 = L_{11} = 0,01$ м; $L_2 = L_4 = L_8 = L_{10} = 0,021$ м; $L_6 = 0,042$ м; $\rho_c = 1000$ кг/м³; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $M = 50$ кг; $a_0 = 4,7055$ Ом·м; $a_1 = -0,0728$ Ом·м/°C; $a_2 = 0,00038$ Ом·м/(°C)², где a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты уравнения $\rho_t = a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot \theta^2$, определяющие значение величины удельного сопротивления обрабатываемой среды от значения температуры ее нагрева. Зависимость № 1 соответствует точке с номером 4 термопары в верхней части емкости на схеме лабораторной модели ЭЭН-Д, зависимость № 2 – точке с номером 5 в средней части емкости, № 3 – точке с номером 6 у дна емкости.

Непроточный ЭЭН с зонированной системой электродов возможно использовать в качестве ЭЭН-Д. Для этого параллельно ЭЭН-Д на питающее напряжение последовательно включаются переменное и постоянное сопротивления. Вместе с двумя термозависимыми сопротивлениями, образующимися между фазным и промежуточным электродом 3-й зоны нагрева, а также нулевым и промежуточным электродом 9-й зоны нагрева, образуется измерительный мост (см. рис. 2.10). Сигнал разбаланса моста снимается с промежуточных электродов и точки соединения последовательно соединенных постоянного и переменного сопротивлений. Измерительный мост

балансируется при холодном состоянии обрабатываемой среды между электродами. При нагреве изменяются сопротивления плеч мостовой схемы, что приводит к разбалансу моста.

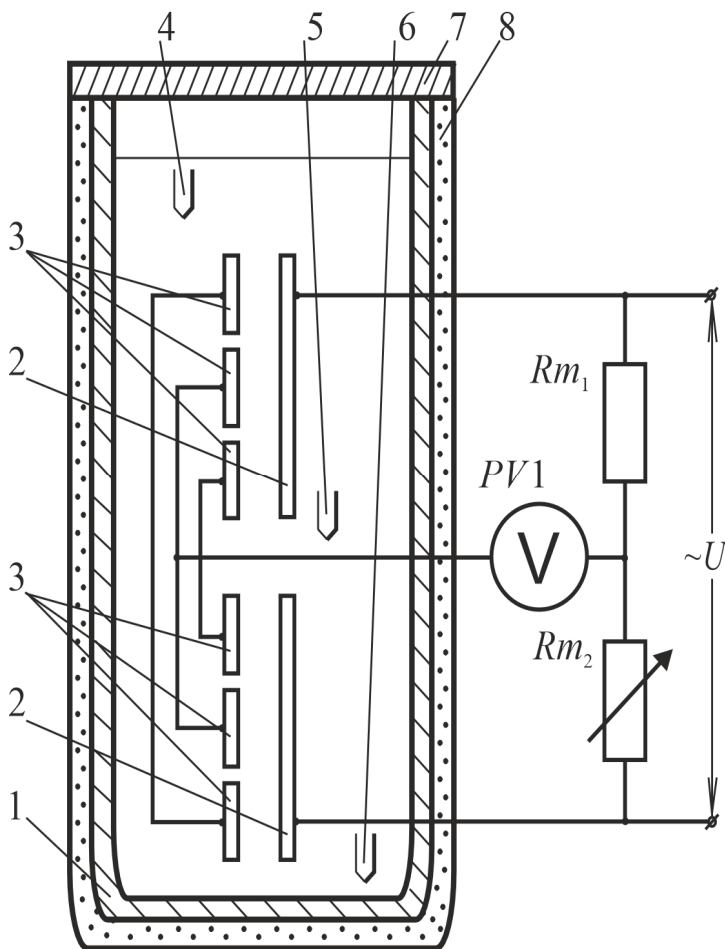
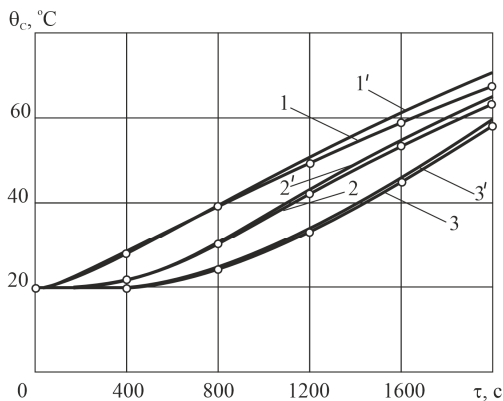
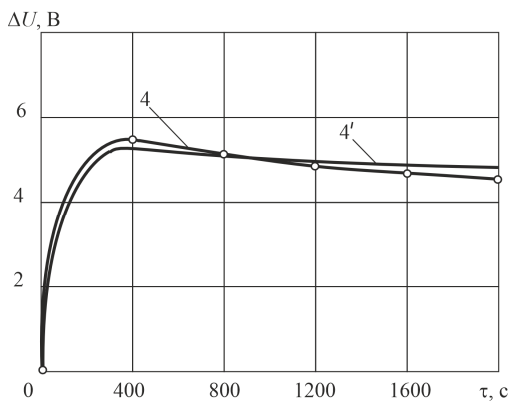


Рис. 2.10. Схема лабораторной модели непроточного ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой:

- 1 – корпус; 2 – электроды основные токоподводящие;
- 3 – электроды дополнительные (промежуточные);
- 4 – термопара в верхней части емкости; 5 – термопара в средней части емкости;
- 6 – термопара у дна емкости; 7 – крышка; 8 – теплоизоляция



а)



б)

Рис. 2.11. Экспериментальные 1, ..., 3 и расчетные 1', ..., 3' графики изменения во времени значений температуры воды при нагреве в непроточном ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой $\theta_c = f(\tau)$ (номер зависимости соответствует точке с таким же номером термопары на схеме лабораторной модели ЭЭН-Д) (а) и экспериментального 4 и расчетного 4' ИС

$\Delta U = f(\tau)$ в измерительной диагонали мостовой измерительной схемы (б),

при $\Pi = 0,07$ м; $H = 0,006$ м; $L_1 = L_3 = L_5 = L_7 = L_9 = L_{11} = 0,01$ м;

$L_2 = L_4 = L_8 = L_{10} = 0,021$ м; $L_6 = 0,042$ м; $a_0 = 4,7055$ Ом·м;

$a_1 = -0,0728$ Ом·м/°C; $a_2 = 0,00038$ Ом·м/(°C)²; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $M = 50$ кг;

$\rho_c = 1000$ кг/м³; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$: 1 – $\theta_c = f(\tau)$ в верхней части емкости;

2 – $\theta_c = f(\tau)$ в средней части емкости;

3 – $\theta_c = f(\tau)$ у дна емкости; 4 – $\Delta U = f(\tau)$ ИС в измерительной диагонали моста

Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений разбаланса мостовой измерительной схемы определяется по формуле

$$\delta_{\Delta U} = \frac{\Delta U_p - \Delta U_{\text{э}}}{\Delta U_{\text{э}}} 100 \%, \quad (2.143)$$

где $\Delta U_{\text{э}}$, ΔU_p – значения ИС разбаланса моста ЭЭН-Д, полученные, соответственно, экспериментально и расчетным путем на ЭВМ, В.

На рис. 2.11, б) приведены экспериментальные и расчетные графики ИС разбаланса моста непроточного ЭЭН-Д с зонированной системой электродов.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования температуры обрабатываемой среды и ИС разбаланса измерительного моста непроточного ЭЭН-Д с зонированной системой электродов показали высокую адекватность математического моделирования процесса нагрева обрабатываемой среды, описанного уравнениями (2.9)...(2.42).

2.3.3 Исследование статических характеристик проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной и секционированной электродной системой

Электротепловые процессы в проточных ЭЭН с плоскопараллельной или секционированной электродной системой описываются дифференциальным уравнением [42, с. 17–25]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H(x) \cdot \Pi(x) \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U^2 \cdot \Pi(x) \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H(x)}. \quad (2.144)$$

Для плоскопараллельной электродной системы уравнение (2.144), при $\partial \theta_c / \partial \tau = 0$, $H(x) = H = \text{const}$, $\Pi(x) = \Pi = \text{const}$ и $\rho_t(\theta_c) = 1/(\gamma_0 \cdot (1 + \alpha_{\text{т}} \cdot \theta_c))$ примет вид:

$$C_p \cdot G \frac{d\theta_c}{dx} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0 (1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c)}{H}. \quad (2.145)$$

Далее выражение (2.145) представим в виде:

$$\frac{d\theta_c}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (2.146)$$

После разделения переменных выражение (2.146) проинтегрируем:

$$\int_{\theta_c(0)}^{\theta_c(x)} \frac{d\theta_c}{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (2.147)$$

Введем обозначение

$$y_c = 1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c. \quad (2.148)$$

Из формулы (2.148) найдем θ_c :

$$\theta_c = \frac{y_c - 1}{\alpha_{\Pi}}. \quad (2.149)$$

Тогда выражение (2.147) с учетом (2.148) и (2.149) примет вид:

$$\int_{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c0}}^{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} \frac{d\left(\frac{y_c - 1}{\alpha_{\Pi}}\right)}{y_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx, \quad (2.150)$$

или после преобразований выражения (2.150) получим:

$$\int_{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{c0}}^{1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} \frac{d\left(\frac{y_c}{\alpha_{\Pi}}\right)}{y_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (2.151)$$

После преобразований выражения (2.151) получим:

$$\frac{1}{\alpha_{\Pi}} \int_{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}}^{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} \frac{dy_c}{y_c} = \int_0^x \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} dx. \quad (2.152)$$

После интегрирования выражения (2.152) получим:

$$\ln(y) \bigg|_{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}}^{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)} = \alpha_{\Pi} \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} x, \quad (2.153)$$

или после преобразований выражения (2.153) получим:

$$\ln \left(\frac{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)}{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}} \right) = \alpha_{\Pi} \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} x. \quad (2.154)$$

Запишем выражение (2.154) в экспоненциальном виде:

$$\frac{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_c(x)}{1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}} = e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} \alpha_{\Pi} \cdot x}. \quad (2.155)$$

Из полученного выражения (2.155) получим распределение температуры обрабатываемой среды по длине ЭЭН:

$$\theta_c(x) = \frac{\left((1+\alpha_{\Pi} \cdot \theta_{cn}) e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0}{C_p \cdot G \cdot H} \alpha_{\Pi} \cdot x} \right) - 1}{\alpha_{\Pi}}. \quad (2.156)$$

Экспериментальные и расчетные графики распределения температуры обрабатываемой среды по длине проточного ЭЭН с плоско-параллельной электродной системой при нагреве воды,

характеризуемого параметрами: $L = 0,082$ м; $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,01$ м; $G = 0,002$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$; коэффициенты уравнения $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$ характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C, приведены на рис. 2.12, а), схема его лабораторной модели – 2.12, б).

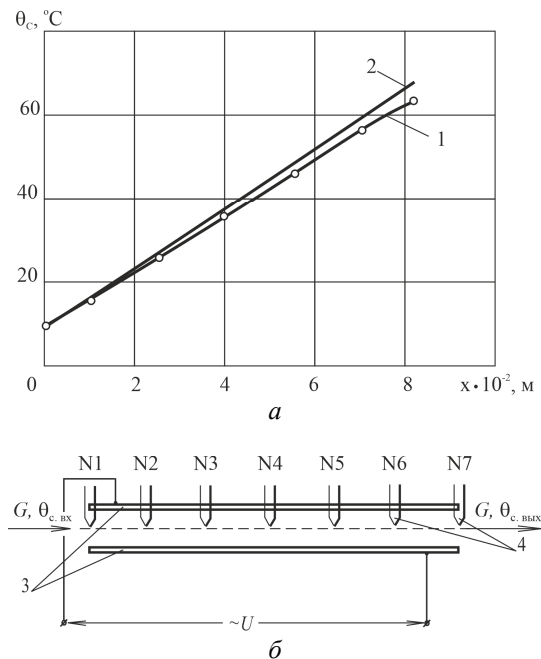


Рис. 2.12. Расчетный 1 и экспериментальный 2 и графики распределения температуры обрабатываемой среды по длине $\theta_c = f(x)$ проточного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (а), при $L = 0,082$ м; $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,01$ м; $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $G = 0,002$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$, и схема лабораторной модели (б):

3 – плоскопараллельные электроды; 4 – термопары

Приведенные на рис. 2.12 графики показывают, что предложенное дифференциальное уравнение описывает электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, с достаточной точностью.

На рис. 2.13 приведены экспериментальные и расчетные графики распределения температуры обрабатываемой среды по длине ЭЭН с секционированной электродной системой при нагреве воды, характеризуемого следующими параметрами: $\Pi = 0,04$ м; $\eta = 0,95$; $X_1 = 0,001$ м; $H_1 = 0,00876$ м; $X_2 = 0,01$ м; $H_2 = 0,00907$ м; $X_3 = 0,02$ м; $H_3 = 0,00951$ м; $X_4 = 0,03$ м; $H_4 = 0,01009$ м; $X_5 = 0,04$ м; $H_5 = 0,01086$ м; $X_6 = 0,05$ м; $H_6 = 0,01193$ м; $X_7 = 0,06$ м; $H_7 = 0,01327$ м; $X_8 = 0,07$ м; $H_8 = 0,01531$ м; $X_9 = 0,08$ м; $H_9 = 0,0197$ м; $L = 0,082$ м; $H_{10} = 0,02054$ м; $G = 0,002$ кг/с; $U = 220$ В; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С); $\rho_c = 1000$ кг/м³; коэффициенты уравнения $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°С.

Решение дифференциального уравнения (2.144) в частных производных проводилось численно. При решении уравнения (2.144), при $H(x) = H_l$ и $\Pi(x) = \Pi_l$ использовалась следующая конечно-разностная схема аппроксимации дифференциального уравнения:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H_l \cdot \Pi_l \frac{\theta_l^{n+1} - \theta_l^n}{\tau_i} + C_p \cdot G \cdot \sigma \frac{\theta_{l+1}^{n+1} - \theta_{l-1}^{n+1}}{2h} + \\ + C_p \cdot G \cdot (1 - \sigma) \frac{\theta_{l+1}^n - \theta_{l-1}^n}{2h} = \frac{U^2 \cdot \Pi_l \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_l}. \quad (2.157)$$

Для решения алгебраической системы уравнений конечно-разностную схему (2.157) преобразуем к виду, обеспечивающему построение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\theta_{l-1}^{n+1} - \frac{2 \cdot \rho_c \cdot H_l \cdot \Pi_l \cdot h}{G \cdot \sigma \cdot \tau_i} \theta_l^{n+1} - \theta_{l+1}^{n+1} = -F_l^n, \quad (2.158)$$

где

$$F_l^n = \frac{\sigma - 1}{\sigma} (\theta_{l+1}^n - \theta_{l-1}^n) + \frac{2 \rho_c \cdot H_l \cdot \Pi_l \cdot h}{G \cdot \sigma \cdot \tau_i} \theta_l^n + \frac{2U^2 \cdot \Pi_l \cdot h \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_l \cdot C_p \cdot G \cdot \sigma}. \quad (2.159)$$

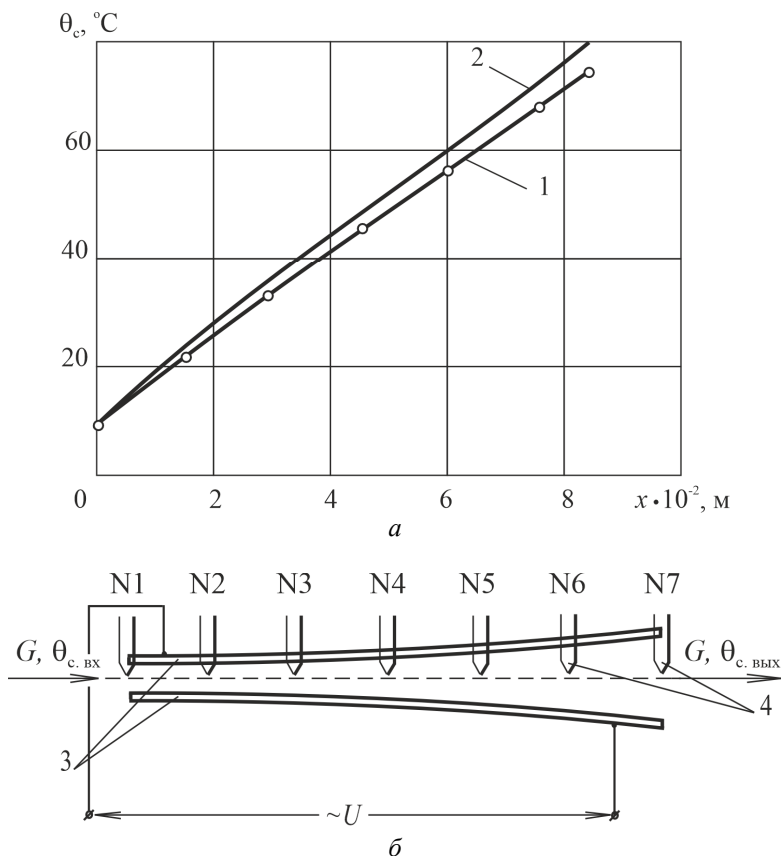


Рис. 2.13. Расчетный 1 и экспериментальный 2 графики распределения температуры обрабатываемой среды по длине $\theta_c = f(x)$ проточного ЭЭН с секционированной электродной системой (а), при $\Pi = 0,04$ м; $X_1 = 0,001$ м; $H_1 = 0,00876$ м; $X_2 = 0,01$ м; $H_2 = 0,00907$ м; $X_3 = 0,02$ м; $H_3 = 0,00951$ м; $X_4 = 0,03$ м; $H_4 = 0,01009$ м; $X_5 = 0,04$ м; $H_5 = 0,01086$ м; $X_6 = 0,05$ м; $H_6 = 0,01193$ м; $X_7 = 0,06$ м; $H_7 = 0,01327$ м; $X_8 = 0,07$ м; $H_8 = 0,01531$ м; $X_9 = 0,08$ м; $H_9 = 0,0197$ м; $L = 0,082$ м; $H_{10} = 0,02054$ м; $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $G = 0,002$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $\eta = 0,95$; $U = 220$ В, и схема лабораторной модели (б): 3 – электроды токоподводящие; 4 – термопары

Производная по x аппроксимируется в виде полусуммы конечно-разностных соотношений на n -м и $(n+1)$ -м временных слоях. Поскольку уравнение нелинейное, то на каждом шаге по времени

его необходимо решать методом приближений (итераций). На каждом шаге по времени строится итерационный процесс и производится уточнение параметров ($\rho_l(\theta_c)$, R , I , θ_c) в зависимости от температуры среды θ_l^{n+1} . Устойчивость итерационного процесса контролируется по числу итераций, необходимых для получения требуемой точности расчета значений температуры. Если число итераций на расчетном временном слое превышает заданное максимальное их число ($N_{\max} \approx 7 \dots 10$), то временной шаг уменьшается в два раза, и расчет повторяется для этого временного слоя с уменьшенным шагом. Если же необходимая точность вычислительного процесса достигается за число итераций, меньшее минимального числа ($N_{\min} \approx 2 \dots 3$), то этот временной слой рассчитывается с шагом в 1,3 раза больше предыдущего. В том случае, если число итераций IM находится в пределах $N_{\min} \leq IM \leq N_{\max}$, то очередной $(n+1)$ -й слой рассчитывается с шагом n -го слоя.

Соблюдение данного условия приводит к ведению вычислительного процесса с переменным шагом по времени. При этом достигается высокая адекватность математической модели расчета статических и динамических характеристик ЭЭН с секционированной электродной системой и реального процесса нагрева. Анализ графиков процесса нагрева обрабатываемой среды во времени показывает, что предложенное дифференциальное уравнение с достаточной точностью описывает статические и динамические электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН с секционированной электродной системой.

2.3.4 Исследование статических и динамических характеристик проточных многозонных электродных электронагревателей-датчиков

Расчет статических и динамических электротепловых характеристик многозонного ЭЭН при нагреве воды, описываемого системой уравнений (2.7) и характеризующегося следующими параметрами: $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,006$ м; $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м;

$L_3 = 0,119$ м; $\eta = 0,95$; $G = 0,0025$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С);
 $\rho_c = 1000$ кг/м³; $U = 220$ В; коэффициенты уравнения
 $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость
удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды):
 $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°С, проводится по блок-схеме алго-
ритма, приведенного на рис. 2.14.

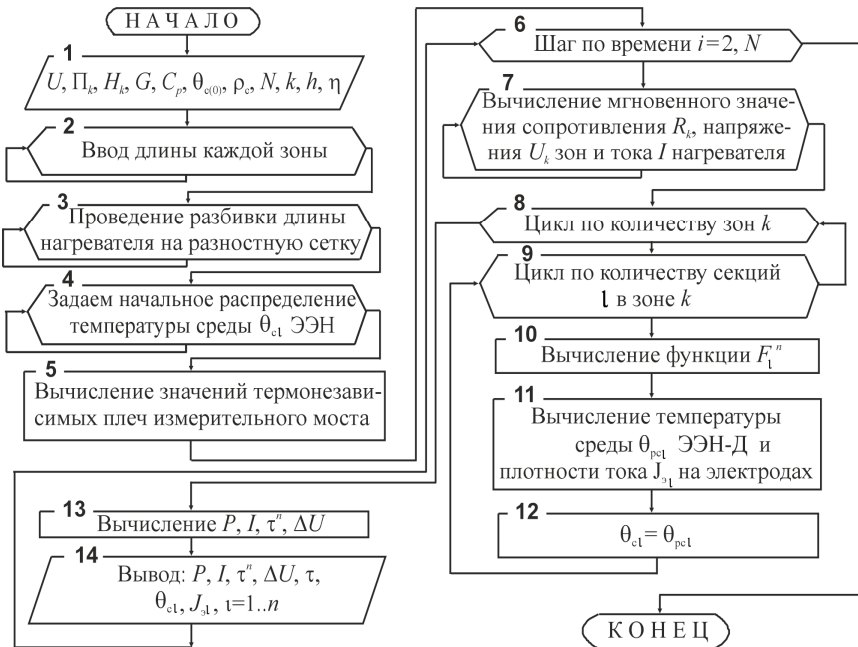


Рис. 2.14. Блок-схема алгоритма расчета статических и динамических характеристик основных электротепловых схем проточных многозонных ЭЭН-Д

В приведенной блок-схеме алгоритма, приняты следующие обо-
значения: P – текущее значение мощности электронагревателя, Вт;
 ΔU – ИС разбаланса моста, В.

На рис. 2.15 приведены графики экспериментального и расчет-
ного распределений температуры воды при нагреве по длине мно-
гозонного ЭЭН-Д, показывающие хорошую адекватность
рассчитанного распределения температур, на рис. 2.16 – схема его
лабораторной модели.

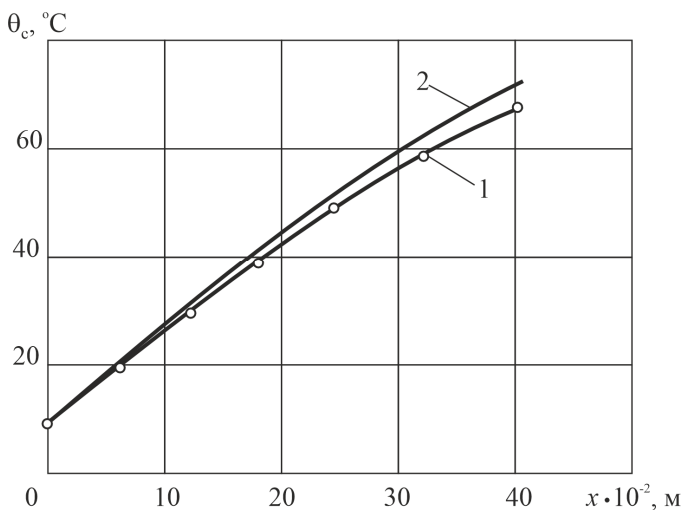


Рис. 2.15. Расчетный 1 и экспериментальный 2 графики распределения температуры обрабатываемой среды по длине $\theta_c = f(x)$ проточного многозонного ЭЭН-Д, при $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,006$ м; $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,119$ м; $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $G = 0,0025$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $\eta = 0,95$; $U = 220$ В

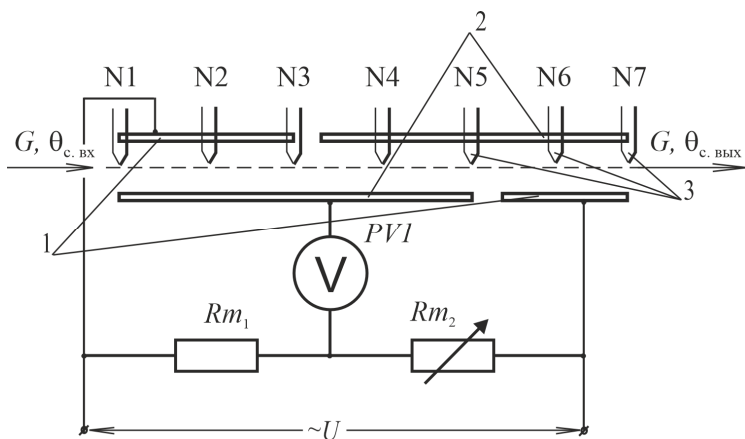


Рис. 2.16. Схема лабораторной модели проточного многозонного ЭЭН-Д:
1 – электроды основные токоподводящие;
2 – электроды дополнительные (промежуточные); 3 – термопары;
PV1 – прибор измерительный; Rm_1 , Rm_2 – сопротивления измерительного моста термoneзависимые

При снятии динамических электротепловых характеристик проточного многозонного ЭЭН-Д, одновременно с распределением температуры в обрабатываемой среде, контролировался ИС в измерительной диагонали моста. Мостовая схема уравнивалась в холодном состоянии, при этом суммарное значение дополнительных термoneзависимых сопротивлений Rm_1 и Rm_2 составляло 6700 Ом. К измерительной диагонали моста подключался электроизмерительный прибор с внутренним сопротивлением 10 000 Ом. По мере разогрева ЭЭН-Д, одновременно с распределением температуры в обрабатываемой среде, контролировалась величина ИС в измерительной диагонали моста [14, с. 23–28]. Напряжение величины ИС в измерительной диагонали мостовой измерительной схемы определяется по формуле [69, с. 55]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R}, \quad (2.160)$$

где ΔU – значение ИС в измерительной диагонали, В;

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

Rm_1, Rm_2 – постоянное и переменное термoneзависимые 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.

На рис. 2.17 приведены расчетные и экспериментальные динамические характеристики проточного многозонного ЭЭН-Д.

В экспериментах использовались следующие приборы:

– потенциометр постоянного тока ПП-63 (класс точности 0,05) с термопарой хромель-копель;

– самописец КСП2-059 – (класс точности 0,5) с термопарой хромель-копель;

– прибор комбинированный электроизмерительный Ц 4311 (класс точности 0,5–1,0);

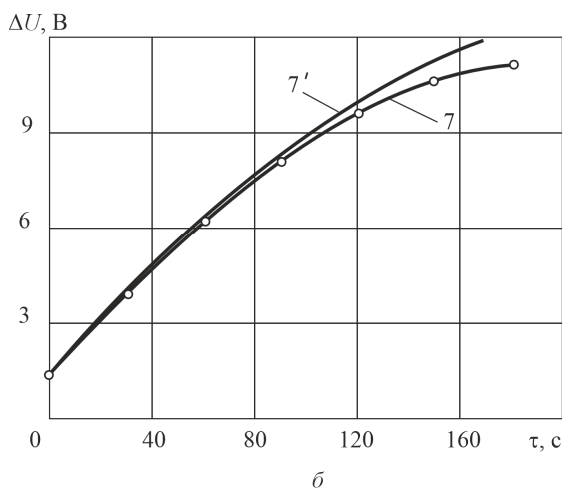
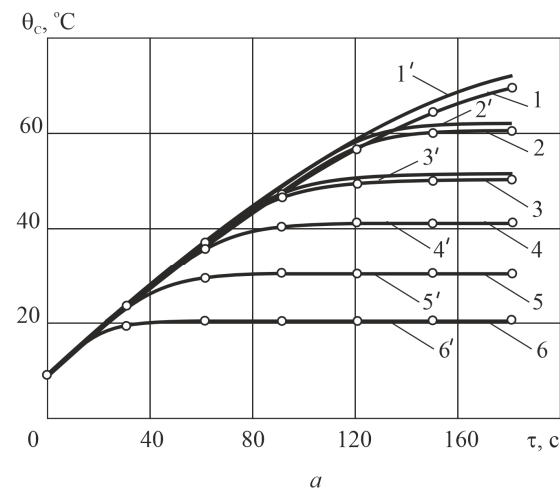


Рис. 2.17. Экспериментальные 1, ..., 6 и расчетные 1', ..., 6' графики изменения температуры обрабатываемой среды во времени $\theta_c = f(\tau)$ по длине проточного многозонного ЭЭН-Д (а) (номер зависимости соответствует точке с таким же номером термопары на схеме лабораторной модели ЭЭН-Д) и экспериментальный 7 и расчетный 7' графики изменения ИС $\Delta U = f(\tau)$ в измерительной диагонали моста (б) во времени, при $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,006$ м; $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,119$ м; $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $G = 0,0025$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $\eta = 0,95$; $U = 220$ В

- вольтметр универсальный В7-16А (класс точности 1);
- универсальный измерительный комплект К505, включающий амперметр, вольтметр и ваттметр (класс точности всех приборов 0,5);
- термодатчик переключатель типа ПМТ;
- лабораторный автотрансформатор РНО-250-5.

2.4 Характеристики электродных электронагревателей, функционально зависимые от распределения температуры обрабатываемой среды

Применение электродного электронагрева позволяет обойтись без промежуточных теплоносителей, поскольку электрическая энергия превращается в тепловую непосредственно в обрабатываемой среде. Однако необходимо рассчитывать изменение температуры по длине электродного ЭН, так как она растет и для большинства термолабильных сред ограничивается различными технологическими требованиями (отложениями на электродах, карамелизацией сахаров, выкипанием или сворачиваемостью обрабатываемой среды и т. д.).

Многозонный ЭЭН позволяет обойтись без датчика температуры, поскольку он выполняет роль как теплогенерирующего, так и контролирующего элементов. Для определения режимов работы ЭЭН необходимо также знать распределение мощности $W(x)$ и сопротивления $R(x)$ по длине x нагревателя. Кроме того, при электродном нагреве ограничивается допустимая плотность тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства.

Сопротивление участков Δx_i обрабатываемой среды проточного ЭЭН с плоскопараллельной системой электродов при линейной зависимости $\rho_i(\theta_c)$ вычисляется по формуле

$$R_{\Delta x_i} = \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha_T \cdot \theta_{c, cp, xi}) \cdot H}{\Pi \cdot \Delta x_i}, \quad (2.161)$$

где $\theta_{c, cp, xi}$ – средняя температура обрабатываемой среды i -го участка, °С;

Δx_i – длина i -го участка ЭЭН, м.

Распределение сопротивления по длине ЭЭН с секционированной электродной системой

$$R(x) = \frac{\rho_t (\theta_{\text{с.ср.}xi}) \cdot H_{xi}}{\Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}, \quad (2.162)$$

где x – текущая длина, от начала ЭЭН, м;

H_{xi}, Π_{xi} – межэлектродное расстояние и ширина электродов, соответственно, на длине x от начала ЭЭН, м.

Аналогично распределяется сопротивление по длине одной из зон многозонного ЭЭН-Д:

$$R_k(x_k) = \frac{\rho_t (\theta_{\text{с.ср.}xi.k}) \cdot H_k}{\Pi_k \cdot \Delta x_{ki}}, \quad (2.163)$$

где x_k – текущая длина зоны ЭЭН-Д от ее начала, м;

$\theta_{\text{с.ср.}xi.k}$ – средняя температура обрабатываемой среды i -го участка зоны, °С;

H_k, Π_k – межэлектродное расстояние и ширина электродов зон ЭЭН-Д, м; Δx_{ki} – длина i -го участка k -й зоны ЭЭН-Д, м.

Мощность нагрева участков Δx_i проточного ЭЭН с плоскопараллельной системой электродов при линейной зависимости $\rho_t(\theta_c)$ определяется по формуле

$$W_{\Delta xi} = \frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \Delta x_i}{\rho_0 \cdot (1 + \alpha_T \cdot \theta_{\text{с.ср.}xi}) \cdot H}. \quad (2.164)$$

Распределение мощности нагрева по длине ЭЭН с секционированной электродной системой

$$W(x) = \frac{U^2 \cdot \Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}{\rho_t (\theta_{\text{с.ср.}xi}) \cdot H_{xi}}. \quad (2.165)$$

Распределение мощности нагрева по длине одной из k -х зон многозонного ЭЭН-Д

$$W_k(x_k) = \frac{U_k^2 \cdot \Pi_k \cdot \Delta x_{ki}}{\rho_t(\theta_{\text{с.ср.}xi.k}) \cdot H_k}, \quad (2.166)$$

где U_k – напряжение k -й зоне многозонного ЭЭН-Д, В.

Аналитически также можно провести расчет изменения плотности тока по длине проточного ЭЭН с плоскопараллельной системой электродов по формуле

$$J(x) = \frac{U}{R_{\Delta xi} \cdot \Pi \cdot \Delta x_i}. \quad (2.167)$$

Сопротивление участка Δx_i обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве при линейной зависимости проводимости от температуры вычисляется по формуле:

$$R_{\Delta xi} = \frac{H}{\gamma_0 (1 + \alpha_{\text{п}} \cdot \theta_{\text{с}}(x)) \Pi \cdot \Delta x_i}. \quad (2.168)$$

Тогда формула (2.167), с учетом выражения (2.168), преобразуется к следующему виду:

$$J(x) = \frac{\gamma_0 (1 + \alpha_{\text{п}} \cdot \theta_{\text{с}}(x)) U}{H}. \quad (2.169)$$

С учетом выражения (2.156), изменение плотности тока по длине проточного ЭЭН с плоскопараллельной системой электродов вычисляется по формуле

$$J(x) = \frac{\gamma_0 \left[1 + \alpha_{\pi} \frac{\left((1 + \alpha_{\pi} \cdot \theta_{cn}) e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \gamma_0 \cdot \eta}{H \cdot C_p \cdot G} \alpha_{\pi} \cdot x} \right) - 1}{\alpha_{\pi}} \right] U}{H}. \quad (2.170)$$

После математических преобразований формула расчета изменения плотности тока по длине проточного ЭЭН с плоскопараллельной системой электродов примет вид:

$$J(x) = \frac{(1 + \alpha_{\pi} \cdot \theta_{cn}) U \cdot \gamma_0}{H} e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \alpha_{\pi} \cdot \gamma_0 \cdot \eta}{H \cdot C_p \cdot G} x}. \quad (2.171)$$

Анализ полученных зависимостей (таблица 2.2) позволяет отметить следующее:

- изменение температуры и плотности тока в обрабатываемой среде по длине проточного ЭЭН с плоскопараллельными электродами описывается экспоненциальным законом и зависит от конструктивных параметров ЭЭН и электро-теплофизических характеристик обрабатываемой среды;

- изменение скорости нагрева и температуры обрабатываемой среды во времени, для непроточного ЭЭН, имеет также экспоненциальный характер изменения при $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ и $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$;

- при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ температура среды $\theta_c(\tau)$ изменяется во времени по линейному закону, скорость изменения температуры является постоянной величиной;

- изменение температуры обрабатываемой среды во времени и скорость охлаждения обрабатываемой среды для непроточных ЭЭН имеют также экспоненциальный характер изменения и зависят от постоянной охлаждения, начальной температуры обрабатываемой среды и температуры окружающей среды;

Таблица 2.2

Электротепловые характеристики непроточных и проточных ЭЭН
с плоскопараллельной системой электродов, функционально зависящие
от распределения температуры обрабатываемой среды

Тип ЭЭН	Электротепловые характеристики ЭЭН
1	2
непроточный	При $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$: $\theta_c(\tau) = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}; \quad \tau = T \cdot \ln \frac{\theta_y - \theta_{cn}}{\theta_y - \theta_c};$ $\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_y - \theta_{cn}}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}; \quad T = \frac{C_p \cdot M}{k \cdot F - E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot V \cdot \Pi};$ $\theta_y = \frac{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc}}{1 - \frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F}}.$
	при $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$: $\theta_c(\tau) = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T'}} \right) + \theta_{cn} \cdot e^{-\frac{\tau}{T'}};$ $\tau = T' \cdot \ln \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{\theta_c - \theta_y};$ $\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_{cn} - \theta_y}{T'} e^{-\frac{\tau}{T'}};$ $T' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot V \cdot \Pi - k \cdot F};$ $\theta_y = - \frac{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} + \theta_{bc}}{\frac{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{k \cdot F} - 1}.$

Тип ЭЭН	Электротепловые характеристики ЭЭН
непроточный	при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$: $\theta_c(\tau) = \frac{\tau}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{\text{BC}} \cdot \tau + \theta_{\text{CH}};$ $T'' = \frac{C_p \cdot M}{E^2 \cdot \gamma_0 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}; \quad \tau = \frac{\theta_c - \theta_{\text{CH}}}{\frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{\text{BC}}};$ $\tau = \frac{\theta_c - \theta_{\text{CH}}}{\frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{\text{BC}}}; \quad \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{1}{T''} + \frac{k \cdot F}{C_p \cdot M} \theta_{\text{BC}} = \frac{1}{T''} + \frac{1}{T_o} \theta_{\text{BC}}.$
	при $\frac{E^2 \cdot H \cdot \Pi \cdot V}{\rho_t(\theta_c)} = 0$: $\theta_c(\tau) = (\theta_{\text{CH}} - \theta_{\text{BC}}) e^{-\frac{\tau}{T_o}} + \theta_{\text{BC}} = \theta_{\text{BC}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_o}} \right) + \theta_{\text{CH}} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_o}};$ $\tau = T_o \cdot \ln \frac{\theta_{\text{BC}} - \theta_{\text{CH}}}{\theta_{\text{BC}} - \theta_c}; \quad \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\theta_{\text{BC}} - \theta_{\text{CH}}}{T_o} e^{-\frac{\tau}{T_o}}; \quad T_o = \frac{C_p \cdot M}{k \cdot F}.$
проточный	$\theta_c(x) = \frac{\left((1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{\text{CH}}) e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_{\Pi}}{C_p \cdot G \cdot H} x} \right) - 1}{\alpha_{\Pi}};$ $R(x) = \frac{\rho_t(\theta_{\text{с.р.}xi}) \cdot H_{xi}}{\Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}; \quad W(x) = \frac{U^2 \cdot \Pi_{xi} \cdot \Delta x_i}{\rho_t(\theta_{\text{с.р.}xi}) \cdot H_{xi}};$ $J(x) = \frac{(1 + \alpha_{\Pi} \cdot \theta_{\text{CH}}) \cdot U \cdot \gamma_0}{H} e^{\frac{U^2 \cdot \Pi \cdot \alpha_{\Pi} \cdot \gamma_0 \cdot \eta}{H \cdot C_p \cdot G} x}.$

– время нагрева и охлаждения обрабатываемой среды в непроточном ЭЭН определяется соответствующими постоянными времени и натуральным логарифмом соотношения установившихся начальных и текущих температур обрабатываемой среды при соотношениях $(k \cdot F) > (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ и $(k \cdot F) < (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$;

– при $(k \cdot F) = (E^2 \cdot \gamma_0 \cdot \alpha_n \cdot H \cdot \Pi \cdot V)$ время нагрева в непроточном ЭЭН определяется по линейной зависимости.

2.5 Влияние физических и конструктивных параметров электродных электронагревателей-датчиков на их электротепловые характеристики

При расчете элементов мостовой схемы ЭЭН-Д требуется достичь заданной или максимально возможной чувствительности. Задача усложняется тем, что выбор промежуточного электрода определяет значения двух изменяющихся плеч мостовой схемы. Они оказывают влияние друг на друга, поскольку имеют между собой электрическую, тепловую и гидравлическую связь. Выбор конструктивных параметров определяется технологическими требованиями, максимально допустимой плотностью тока и скоростью нагрева. При разработке методики расчета ЭЭН-Д с заданной чувствительностью необходимо провести анализ влияния следующих параметров: номера подключения промежуточного электрода n_k от начала нагревателя, температуры $\theta_{сн}$ на входе в ЭЭН-Д, величины массового расхода G обрабатываемой среды и напряжения питания U на чувствительность ЭЭН-Д. Изменяя один из параметров, другие зафиксировали на постоянном уровне. Исследуемые параметры варьировались в пределах: $n_k - 1...3$, $U - 200...230$ В, $G - 0,0023...0,0030$ кг/с, $\theta_{сн} - 5$ °С...14 °С.

Расчет проводился при условии, что параллельно ЭЭН-Д включались два последовательно соединенных сопротивления: постоянное и переменное. К точке их соединения и к одному из промежуточных электродов подключался измерительный прибор. Измерительный мост балансировался в холодном состоянии. По мере нагрева обрабатываемой среды изменялся ИС ΔU в диагонали измерительного моста.

Первоначально исследовалось влияние выбора номера подключения промежуточного электрода с начала нагревателя n_k на чувствительность ЭЭН-Д [78, с. 22]. Результаты исследования показали, что наибольшая чувствительность ЭЭН-Д наблюдается при выборе такого промежуточного электрода в качестве измерительного, при котором термозависимые сопротивления измерительного моста ЭЭН-Д, сбалансированного в холодном состоянии, будут максимально близки по величине. Как правило, это условие соответствует выбору в качестве измерительного такого промежуточного электрода, который находится ближе к середине нагревателя. На втором этапе эксперимента для выбранного промежуточного электрода исследовалось влияние температуры θ_{cn} на входе в ЭЭН-Д, величины массового расхода G обрабатываемой среды и напряжения питания U на чувствительность ЭЭН-Д.

По этой же методике были проведены проверочные опыты на физической модели. Сравнение результатов расчета с экспериментом подтвердило высокую адекватность предложенной методики.

Относительная зависимость ИС ΔU от выбора промежуточного электрода для шестизонного ЭЭН-Д представлена на рис. 2.18. На графике ΔU_3 – значение ИС разбаланса моста на третьем (с начала нагревателя) промежуточном электроде, при $\theta_{cn} = 10^\circ\text{C}$, $G = 0,0025 \text{ кг/м}^3$, $U = 220 \text{ В}$, коэффициент α_T и удельное сопротивление ρ_o уравнения $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

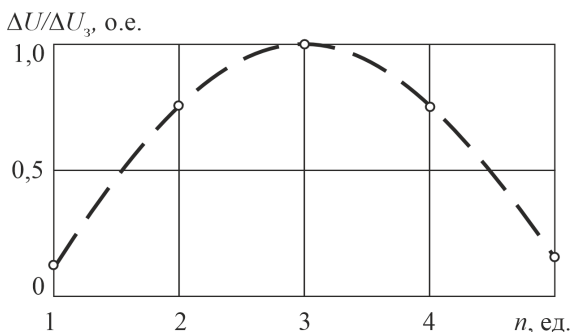


Рис. 2.18. График зависимости относительного изменения ИС $\Delta U / \Delta U_3$ многозонного ЭЭН-Д от выбора промежуточного электрода, при $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $\theta_{cn} = 10^\circ\text{C}$; $G = 0,0025 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$

Графики изменения ИС ЭЭН-Д, имеющего два термозависимых сопротивления, в зависимости от изменения температуры θ_{cn} на входе в ЭЭН-Д, массового расхода G обрабатываемой среды и напряжения питания U представлены на рис. 2.19. На графике за базовое единичное значение принимается ΔU_3 – значение ИС разбаланса моста на третьем (с начала нагревателя) промежуточном электроде, $\theta_{cn} = 10^\circ\text{C}$, $G = 0,0025 \text{ кг/м}^3$, $U = 220 \text{ В}$, коэффициент α_T и удельное сопротивление ρ_o уравнения $\rho_i(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

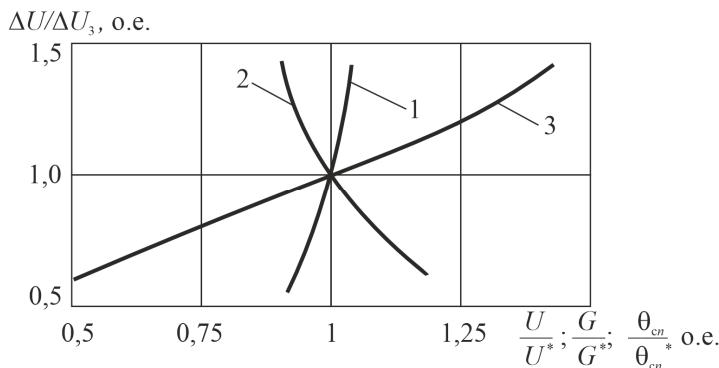


Рис. 2.19. Графики зависимости относительного изменения ИС $\Delta U / \Delta U_3$ многозонного ЭЭН-Д от G/G^* (кривая 1), U/U^* (кривая 2), $\theta_{cn}/\theta_{cn}^*$ (кривая 3) на третьем (с начала нагревателя) промежуточном электроде, при $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $\theta_{cn}^* = 10^\circ\text{C}$; $G^* = 0,0025 \text{ кг/м}^3$; $U^* = 220 \text{ В}$

Анализ полученных графиков показывает, что выбор промежуточного электрода в средней части ЭЭН-Д обеспечивает наибольший ИС ΔU , т. е. на ИС ЭЭН-Д оказывает влияние соотношение сопротивлений мостовой схемы, что подтверждается общей теорией мостовых схем [69, с. 39–41].

Одной из конструктивных особенностей многозонных ЭЭН-Д является такое размещение в одном корпусе нескольких пар электродов, чтобы исключить или уменьшить взаимное влияние электродов соседних зон нагрева друг на друга. Это взаимное влияние выражается в прохождении тока между электродами соседних зон нагрева, что приводит к искажению плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства.

Чтобы определить степень взаимного влияния соседних зон нагрева друг на друга, была изготовлена экспериментальная установка ЭЭН-Д. Каждый из электродов был разбит на четыре одинаковых участка, изолированных друг от друга (рис. 2.20). Разработанный ЭЭН-Д характеризуется следующими параметрами $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{С)}$; $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $H = 0,006 \text{ м}$; $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0,04 \text{ м}$; $L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = 0,0315 \text{ м}$; $L_9 = L_{10} = L_{11} = L_{12} = 0,03 \text{ м}$; $G = 0,0034 \text{ кг/с}$; $U = 220 \text{ В}$; коэффициенты уравнения $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды (воды): $\rho_o = 37,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{С}$. Величина потока обрабатываемой среды поддерживалась при помощи напорного бака с поплавковым регулятором уровня путем стабилизации уровня в баке, температура в баке поддерживалась при помощи вмонтированных в бак ТЭНов, подключенных к питающей электрической сети через терморегулятор.

В опытах проводились измерения величины тока на каждом участке электродов. По этим измерениям судили о величине плотности тока на соответствующих участках электродов. При проведении серии опытов изменялось расстояние между соседними зонами нагрева $L_{мз}$, а остальные параметры электронагревателя и режим нагрева были зафиксированы.

Сравнение результатов опыта проводилось с расчетными значениями, которые определили при решении системы уравнений (2.7). Для решения первого уравнения системы (2.7) запишем его в следующем конечно-разностном виде [70, с. 255–256]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H \cdot \Pi \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j}^n}{\tau} + C_p \cdot G \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j-1}^{n+1}}{h} = \frac{U_{Zk}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c j}^n) \cdot H}, \quad (2.172)$$

где $\theta_{c j}^{n+1}$ – температура обрабатываемой среды (воды) на j -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, $^\circ\text{С}$;

$\theta_{c j}^n$ – температура обрабатываемой среды (воды) на j -й секции n -м расчетном (предыдущем) шаге, $^\circ\text{С}$;

$\theta_{c j-1}^{n+1}$ – температура обрабатываемой среды (воды) на $j-1$ -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, $^\circ\text{С}$.

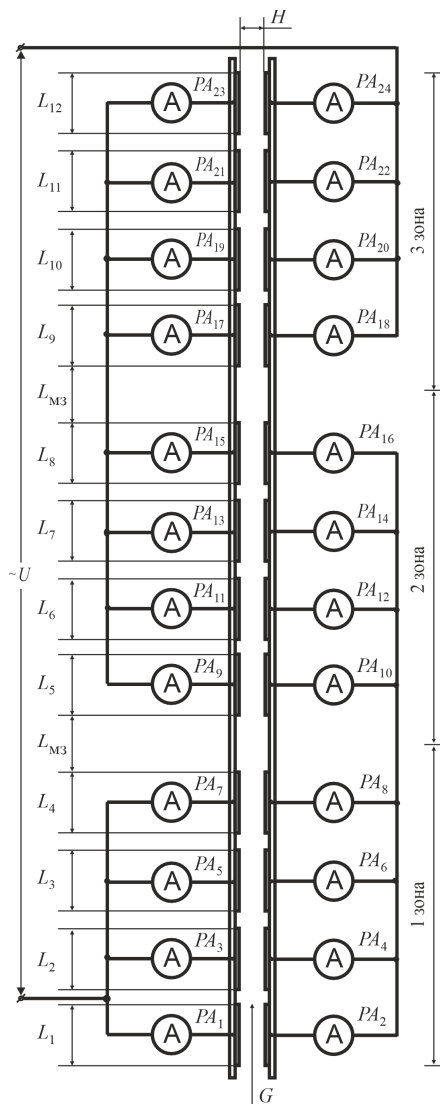


Рис. 2.20. Схема экспериментальной установки ЭЭН-Д для определения влияния расстояния между зонами нагрева на электротепловые характеристики, при $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0,04$ м; $L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = 0,0315$ м; $L_9 = L_{10} = L_{11} = L_{12} = 0,03$ м; $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $\rho_o = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C; $G = 0,002$ кг/с; $U = 220$ В; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³

Далее преобразуем уравнение (2.172) к следующему виду:

$$\frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j}^n}{\tau} + \frac{G}{\rho_c \cdot H \cdot \Pi} \cdot \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j-1}^{n+1}}{h} = F_{c j}^n, \quad (2.173)$$

где

$$F_{c j}^n = \frac{U_{Z k}^2 \cdot \eta}{\rho_t (\theta_{c j}^n) \cdot H^2 \cdot C_P \cdot \rho_c}. \quad (2.174)$$

Скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д v_c находим из выражения

$$v_c = \frac{G}{\rho_c \cdot H \cdot \Pi}. \quad (2.175)$$

С учетом скорости обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д v_c выражение (2.173) примет вид:

$$\frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j}^n}{\tau} + v_c \cdot \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j-1}^{n+1}}{h} = F_{c j}^n. \quad (2.176)$$

После математических преобразований, из уравнения (2.176), получаем следующее разностное уравнение

$$\theta_{c j}^{n+1} = \frac{\tau \cdot h \cdot F_{c j}^n + h \cdot \theta_{c j}^n + \tau \cdot v_c \cdot \theta_{c j-1}^{n+1}}{h + \tau \cdot v_c}. \quad (2.177)$$

Распределение напряжения на k -х зонах нагрева обрабатываемой среды $U_{Z k}$ описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \sum_{k=1}^N U_{Zk} = \sum_{k=1}^N I_n \cdot R_{Zk}; \\ I_n = U / R; \\ R = \sum_{k=1}^N R_{Zk}; \\ R_{Zk} = \int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H dx / \left(\int_0^{L_k} P dx \cdot L_k^2 \right), \end{array} \right. \quad (2.178)$$

где I_n – ток, протекающий через обрабатываемую среду на всех зонах нагрева ЭЭН-Д, А;

R_{Zk} – сопротивления обрабатываемой среды на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, Ом;

R – суммарное сопротивление обрабатываемой среды на всех зонах нагрева ЭЭН-Д, Ом;

L_k – длина k -й зоны нагрева ЭЭН-Д, м.

Для решения уравнения (2.177), с учетом изменяющегося в начальный период нагрева распределения напряжения на k -х зонах нагрева обрабатываемой среды U_k применяем итерационный процесс, который прекращается при выполнении условия:

$$\max_i \left(\frac{|\theta_{ci}^{n+1} - \theta_{ci}^n|}{\theta_{ci}^n} \right) \leq \varepsilon_\theta, \quad (2.179)$$

где ε_θ – погрешность вычислений температуры обрабатываемой среды (воды).

Блок-схема алгоритма расчета тока на участках обрабатываемой среды ЭЭН-Д представлена на рис. 2.21. В разработанной математической модели и блок-схеме алгоритма (см. рис. 2.21) приняты следующие обозначения:

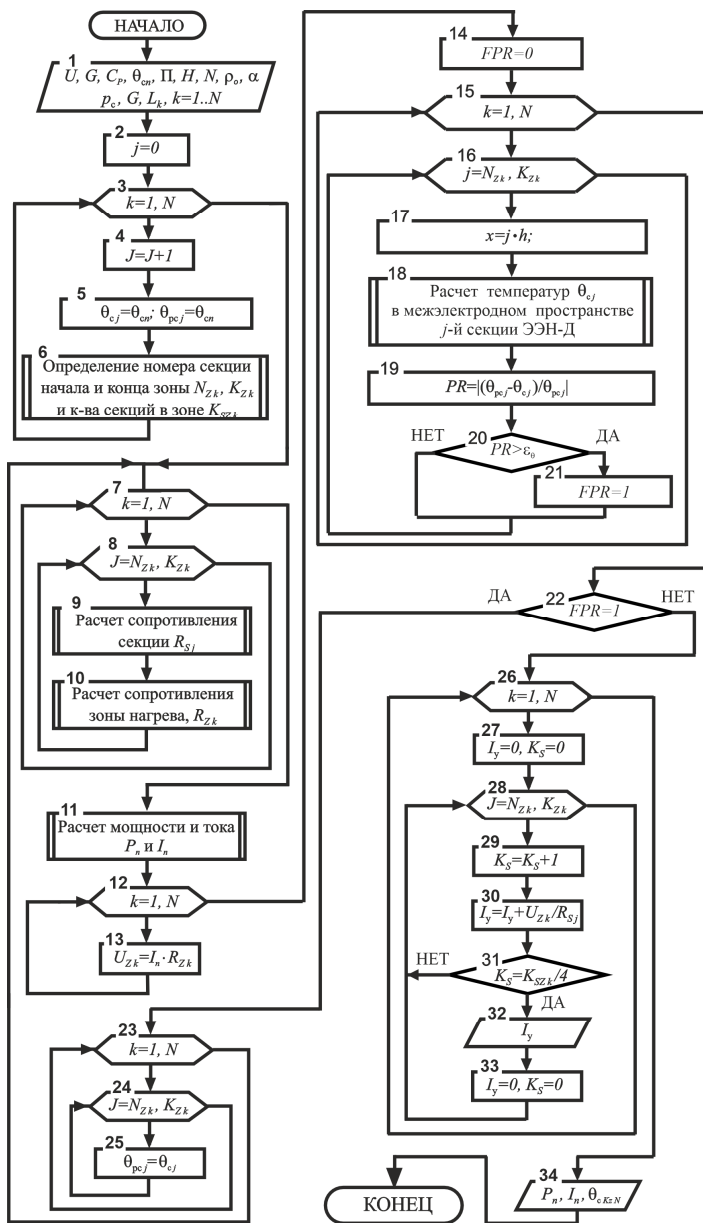


Рис. 2.21. Блок-схема алгоритма расчета тока на участках обрабатываемой среды ЭН-Д

K_{Zk} – номер последней секции k -й зоны ЭЭН-Д

$$\left(K_{Zk} = \sum_{kp=1}^k L_{kp} / h \right),$$

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

$N_{Zk} = K_{Zk-1} + 1, (k = 2 \dots N)$ – номер первой секции k -й зоны ЭЭН-Д (для 1-й зоны $K_{Z1} = 1$);

K_{SZk} – количество секции k -й зоны ЭЭН-Д;

ε_θ – относительная погрешность вычислений значений температуры обрабатываемой среды (воды);

I_n – ток, протекающий через обрабатываемую среду на всех зонах нагрева ЭЭН-Д, А;

I_y – ток, протекающий через участок обрабатываемой среды, А;

K_S – количество секций участка обрабатываемой среды;

P_n – мощность ЭЭН-Д, Вт;

U_{Zk} – напряжение на k -й зоне ЭЭН-Д, В;

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

В блоке 6 блок-схемы алгоритма, приведенной на рис. 2.21, проводится расчет номеров первых N_{Zk} , последних K_{Zk} секции и количества секций K_{SZk} по зонам ЭЭН-Д.

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

FPR – переменная, определяющая окончание итерационного расчета температур обрабатываемой среды при снижении относительной погрешности вычислений значений температуры ε_θ до допустимой величины;

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

R_{Sj} – сопротивление обрабатываемой среды на j -й секции ЭЭН-Д

$$\left(R_{Sj} = \rho_t(\theta_{ci}^n) \cdot H / (h \cdot \Pi) \right), \text{ Ом};$$

В блоке 9 блок-схемы алгоритма, приведенной на рис. 2.21, проводится расчет сопротивления обрабатываемой среды на j -й секции ЭЭН-Д $R_{Sj} \left(R_{Sj} = \rho_t(\theta_{ci}^n) \cdot H / (h \cdot \Pi) \right)$.

В блоке 10 блок-схемы алгоритма, приведенной на рис. 2.21, проводится расчет сопротивления обрабатываемой среды на k -й зоне ЭЭН-Д R_{Zk} по 4-му уравнению системы (2.178).

В блоке 11 блок-схемы алгоритма, приведенной на рис. 2.21, проводится расчет тока, протекающего через обрабатываемую среду на всех зонах нагрева I_n и мощности P_n ЭЭН-Д.

В блоке 18 блок-схемы алгоритма, приведенной на рис. 2.21, проводится расчет температуры θ_c в обрабатываемой среде межэлектродного пространства j -й секции ЭЭН-Д по уравнению (2.177).

В таблице 2.3 представлено расчетное и экспериментальное распределение тока по длине ЭЭН-Д при различных расстояниях между зонами нагрева. В таблице приняты следующие обозначения:

N_3 – номер зоны нагрева и электрода в зоне по ходу потока обрабатываемой среды;

I_p – расчетное значение тока на участках электродов, А;

I – ток, протекающий через зоны нагрева;

I_1 – ток, измеренный на участках электродов, при соотношении $L_{M3} / H = 1$;

I_2 – ток, измеренный на участках электродов, при соотношении $L_{M3} / H = 2$;

I_3 – ток, измеренный на участках электродов, при соотношении $L_{M3} / H = 4$;

где L_{M3} / H – соотношение расстояния между зонами нагрева и межэлектродного расстояния;

δ_I – относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений токов, рассчитываемое по формуле

$$\delta_I = ((I_p - I_j) / I_j) \cdot 100 \%, \quad (2.180)$$

где I_j – ток (I_1, I_2, I_3) на участках электродов, измеренный при различных соотношениях расстояния между зонами нагрева и межэлектродного расстояния.

Таблица 2.3

Распределение тока по длине электродов многозонного ЭЭН-Д
при различных расстояниях между зонами нагрева

Номер зоны нагрева и электрода N_z , в зоне по ходу потока обрабатываемой среды	Расчетное значение силы тока I_p на участках электродов, А	Значение силы тока I , протекающего через зоны нагрева, А	Значение силы тока I_3 , измеренное на участках электродов при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=4$, А	Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений силы тока δ_I при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=4$, %	Значение силы тока I_2 , измеренное на участках электродов при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=2$, А	Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений силы тока δ_I при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=2$, %	Значение силы тока I_1 , измеренное на участках электродов при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=1$, А	Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений силы тока δ_I при соотношении $L_{\text{МЗ}}/H=1$, %
3.12	0,610	2,3	0,64	4,69	0,65	6,15	0,68	10,29
3.11	0,585		0,58	0,86	0,6	2,50	0,59	0,85
3.10	0,563		0,57	1,23	0,57	1,23	0,57	1,23
3.9	0,544		0,50	8,8	0,48	13,33	0,46	18,26
2.8	0,608	2,3	0,61	0,33	0,55	10,55	0,53	14,72
2.7	0,585		0,58	0,86	0,60	2,50	0,58	0,86
2.6	0,564		0,57	1,05	0,58	2,76	0,55	2,55
2.5	0,545		0,53	2,83	0,57	4,39	0,64	14,84
1.4	0,601	2,3	0,61	1,48	0,54	11,30	0,56	7,32
1.3	0,583		0,60	2,83	0,61	4,43	0,62	5,97
1.2	0,567		0,56	1,25	0,60	5,50	0,60	5,50
1.1	0,552		0,52	6,15	0,55	0,36	0,52	6,15

На рис. 2.22 представлен график зависимости наибольшего отклонения измеренного тока амперметрами PA_7 и PA_{10} , PA_{15} и PA_{18} (см. рис. 2.20) на участках электродов, которые граничат с соседними зонами нагрева (1-й и 2-й, 2-й и 3-й зон нагрева), от расчетной величины, в зависимости от расстояния между зонами нагрева.

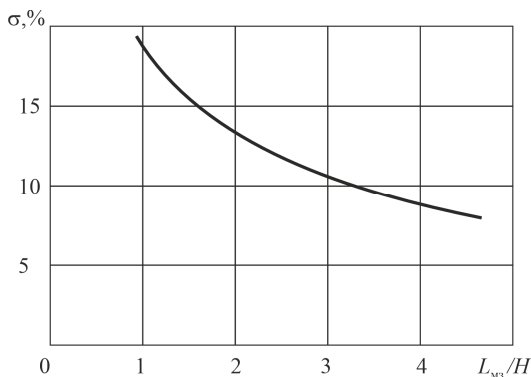


Рис. 2.22. График зависимости отклонения силы тока на электродах от расчетного при разных расстояниях между зонами нагрева

Анализ изменений тока показывает, что при расстоянии между зонами, равном 4 межэлектродным расстояниям и более, влияние соседних зон незначительно, и его при расчетах можно не учитывать.

Из проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Изменение скорости нагрева $\partial \theta_c / \partial \tau$ и температуры обрабатываемой среды $\partial \theta_c(\tau)$ по длине проточного ЭЭН описывается экспоненциальными зависимостями и определяется их конструктивными параметрами, а также теплофизическими характеристиками обрабатываемой среды [54, с. 26–31].

2. Полученные статические характеристики проточных ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, описывающие распределение температуры $\theta(x)$, сопротивления $R(x)$, мощности $W(x)$ и плотности тока $J(x)$ по длине ЭЭН, имеют экспоненциальные зависимости, определяющиеся их конструктивными параметрами и теплофизическими характеристиками обрабатываемой среды [54, с. 26–31].

3. Чувствительность многозонного проточного ЭЭН-Д зависит от выбора соотношения термозависимых сопротивлений измерительного моста, т. е. промежуточного электрода в качестве измерительного, и от ТКС обрабатываемой среды [14, с. 23–28].

4. Влияние напряжения питания U , величины массового расхода обрабатываемой среды G и температуры на входе в ЭЭН-Д $\theta_{св}$ на величину ИС ΔU объясняется изменением мощности ЭЭН-Д и соответствующим изменением температуры обрабатываемой среды на выходе нагревателя [14, с. 23–28].

5. При конструировании многозонных ЭЭН и ЭЭН-Д, для исключения взаимного влияния соседних зон нагрева друг на друга, расстояние между этими зонами необходимо принимать 4 межэлектродным расстояниям и более [14, с. 23–28].

6. Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений ИС разбаланса моста ΔU в непроточном многозонном ЭЭН-Д свидетельствует о высокой адекватности предложенной ММ численного моделирования на ЭВМ его электротепловых характеристик [14, с. 23–28].

7. 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. 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 [14, с. 23–28; 41, с. 9–11; 42, с. 17–25].

8. 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 [14, с. 23–28; 41, с. 9–11].

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СРЕД

В СХП многие корма требуют тепловой обработки. Как правило, корма, подлежащие термообработке, обладают выраженной зависимостью удельного сопротивления от температуры. Удельная проводимость и ТКП различных кормовых материалов [64, с. 92–97] представлены в таблице 2.1. Для отопления и горячего водоснабжения бытовых и производственных помещений расходуется значительное количество энергии, идущее на нагрев воды. При электродном нагреве обрабатываемой среды плотность тока в ней не должна превышать допустимых значений из-за возникновения электролиза [1, с. 49]. Температурные зависимости допустимой плотности тока и удельного сопротивления обрабатываемой среды являются определяющими зависимостями при расчете ЭЭН, поэтому для воды и других, широко используемых токопроводящих термообрабатываемых сред они изучены достаточно хорошо.

В то же время одними из наиболее распространенных термолабильных с.-х. сред, требующих термообработки, являются молоко и молочные продукты [79, с. 35]. Однако явно выраженная температурная зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды приводит к значительной неравномерности плотности тока в обрабатываемой среде и интенсивному образованию отложений на электродах ЭЭН [23, с. 11], что сдерживает использование электродного нагрева для термообработки данной группы термолабильных сред.

Проводимость молока изучена достаточно хорошо [80, с. 97]. В заготавливаемом молоке проводимость изменяется в узких пределах ($0,4\text{--}0,46\text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$). Однако для молочных продуктов (молочной сыворотки, обрат, ряженки и пр.), подвергающихся переработке и хранению, проводимость отклоняется от средних значений на значительную величину. Это вызывает значительные сложности при разработке и эксплуатации ЭЭН, поскольку они рассчитываются на определенные фиксированные значения удельного сопротивления и ТКС обрабатываемой среды. Следовательно, актуальным является вопрос изучения их электрофизических

характеристик, в частности температурной зависимости удельного электрического сопротивления от физико-химических свойств (кислотности, концентрации хлоридов и т. п.).

Для оптимизации конструктивно-технологических параметров ЭЭН необходимо исследовать изменение удельного сопротивления молочных продуктов при хранении (зависимость удельного сопротивления от кислотности) и изменения удельного сопротивления молочных продуктов при изменении в них концентрации хлоридов, поскольку хлориды обеспечивают проводимость молочных продуктов, а их концентрация зависит от многих факторов (в том числе и от рациона кормления КРС).

3.1 Методика исследования электрофизических характеристик сельскохозяйственных термолабильных сред

Применительно к ЭЭН, одним из важнейших электрофизических параметров, определяющих динамику и статику нагрева среды, является ее удельное электрическое сопротивление, которое определяет распределение тока и мощности в межэлектродном пространстве ЭЭН. Для исследования электрофизических характеристик молока необходим анализ его физико-химических свойств и ранжирование их по степени влияния на удельное сопротивление.

Электрофизические свойства молока как единой полидисперсной системы обусловлены свойствами его компонентов и взаимодействиями между ними. Следовательно, любые изменения в содержании и состоянии дисперсных фаз системы, т. е. составных частей молока, должны сопровождаться изменениями его физико-химических свойств, влияющих на электрофизические характеристики молока. Почти все компоненты молока оказывают влияние на плотность и кислотность молока. На остальные физико-химические свойства молока его составные части влияют по-разному. От массовой доли, дисперсности и гидратационных свойств белков в большей степени зависят вязкость и поверхностное натяжение молока, но почти не зависят величины электропроводности и осмотического давления. Минеральные вещества молока значительно воздействуют на его кислотность, электропроводность, осмотическое давление и температуру замерзания,

но не влияют на вязкость. От содержания лактозы зависят осмотическое давление и температура замерзания молока [80, с. 89–97].

Кислотность молока выражают в единицах титруемой кислотности (в градусах Тернера) и величиной pH при значениях температуры 20 °С. Титруемая кислотность по СТБ 1598–2006 «Молоко коровье. Требования при закупках», ГОСТ Р 58340–2019 «Молоко и молочная продукция. Метод отбора проб с торговой полки и доставки проб в лабораторию», ИСО 22000 «Требования к организациям, участвующим в пищевой промышленности», регламенту (ЕС) № 854/2004 Европейского парламента и Совета Европы от 29 апреля 2004 со специальными процессуальными предписаниями по государственному контролю пищевых продуктов животного происхождения, потребляемых человеком, является критерием оценки качества заготавливаемого молока. При хранении сырого молока титруемая кислотность повышается по мере развития в нем микроорганизмов, сбраживающих молочный сахар с образованием молочной кислоты. Однако бывают отклонения естественной кислотности молока от физиологической нормы в случае нарушения рационов кормления.

Более точно кислотность молока можно контролировать, используя pH -метод, с помощью унифицированного потенциометра-кислотомера типа pH -222. Активная кислотность свежего молока pH , отражающая концентрацию ионов водорода, колеблется в достаточно узких пределах от 6,55 до 6,75. Так как в действующих ГОСТах и технологических инструкциях кислотность выражается в единицах титруемой кислотности, для сопоставления с ними показаний pH , для молока и основных кисломолочных продуктов имеются установленные ВНИМИ и ВНИИМСом усредненные соотношения [80, с. 91], представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Соотношение титруемой кислотности и активной кислотности
для заготавливаемого молока

Титруемая кислотность, °Т	15	16	17	18	19	19,5	20	21	22	23	24	25
Среднее значение активной кислотности, pH	6,75	6,73	6,69	6,64	6,58	6,55	6,52	6,46	6,41	6,36	6,31	6,26

Осмотическое давление молока $P_{\text{осм}}$ обусловлено, главным образом, высокодисперсными веществами: лактозой – примерно на 50 % и ионами солей – преимущественно хлоридами. Осмотическое давление обычно рассчитывают по значению температуры замерзания молока.

Осмотическое давление молока в среднем составляет 0,66 МПа, значение температуры замерзания нормального молока в среднем равна $-0,54^{\circ}\text{C}$, является постоянной величиной и колеблется в пределах от $-0,51^{\circ}\text{C}$ до $-0,59^{\circ}\text{C}$. Эта величина зависит от химического состава молока, поэтому изменяется в течение лактационного периода, при заболеваниях животных, а также при разбавлении молока водой, добавлении к нему соды и при повышении кислотности. При добавлении в молоко воды значение его температура замерзания повышается на $0,0006^{\circ}\text{C}$ [80, с. 96].

На основании вышеизложенного можно сделать заключение, что проводимость молока обусловлена ионами солей (преимущественно хлоридами Cl^- , Na^+ , K^+). Большая часть ионов Ca^{2+} , PO_4^{3-} связана с мицеллами казеина и в формировании проводимости не принимает участия.

Проводимость молока зависит от соотношения в молоке лактоза–хлориды, которое зависит от рациона кормления, состояния здоровья животного, его породы, сезона года и т. д. На проводимость молока также влияет осмотическое давление, которое может изменяться при добавлении в молоко воды, соды и т. д. При хранении молока и молочных продуктов проводимость также изменяется при изменении их кислотности.

Обезжиренное молоко (обрат) отличается от цельного молока значительно меньшим содержанием жира и жирорастворимых витаминов. В обезжиренном молоке содержится $\frac{2}{3}$ сухих веществ молока, в том числе практически весь белковый комплекс. Оно содержит 8,8 %...9,1 % сухих веществ, в том числе 0,05 %...0,50 % молочного жира, 3,2 % – белка, 4,7 %...4,8 % – лактозы, 0,70 %...0,75 % – минеральных веществ. В процессе подготовки к сепарированию молочного жира молоко подвергается тепловой и механической обработке, влияющей в определенной степени на качество обрата. При нагревании молока выше 85°C частично изменяется казеин. Альбумин начинает денатурироваться при

60 °С...65 °С. Растворимые фосфорнокислые соли переходят в нерастворимые. Пастеризованное молоко медленнее свертывается сычужным ферментом. Обезжиренное молоко содержит большую часть водорастворимых витаминов. Энергетическая ценность 1кг обрата составляет 1440 кДж/кг [81, с. 370–373].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для молочных продуктов, подвергавшихся переработке и хранению,, в том числе для обрата, удельное сопротивление может отклоняться от средних значений на значительную величину. Поэтому необходимы исследования влияния на изменение удельного сопротивления обрата наиболее значимых факторов.

Схема установки для определения удельного сопротивления обрабатываемой среды и ТКС [82, с. 236–239] изображена на рис. 3.1. Установка состоит из электролитической ванночки 1 с анализируемой средой, вольтметра 2, миллиамперметра 3 и лабораторного

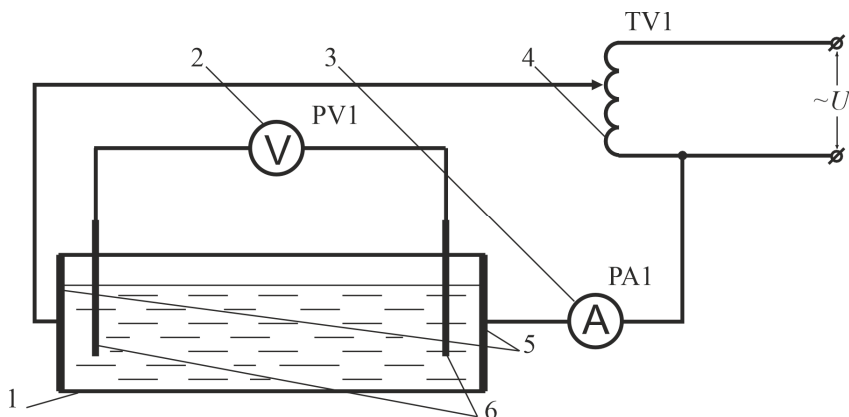


Рис. 3.1. Схема установки для определения удельного сопротивления и ТКС:

- 1 – ванночка из пластика с анализируемой средой; 2 – вольтметр;
- 3 – миллиамперметр; 4 – автотрансформатор лабораторный;
- 5 – электроды из титана; 6 – зонды проволоочные

автотрансформатора 4. Питание на установку подается от сети переменного тока промышленной частоты напряжением 220 В. Электролитическая ванночка прямоугольного сечения имеет небольшие размеры (100×200×50 мм) и изготовлена из электроизоляционного материала. Вплотную к торцевым стенкам ванночки прилегают

плоские прямоугольные электроды 5 из титана. По длине ванночки, на некотором расстоянии от электродов, установлены два проводочных зонда 6 диаметром 1 мм, концы которых в процессе измерений погружают в анализируемую среду.

Удельное электрическое сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = R \cdot S_{\text{эл}} / L_{\text{зон}} = U_o \cdot S_{\text{эл}} / (I_o \cdot L_{\text{зон}}), \quad (3.1)$$

где $S_{\text{эл}}$ – площадь перпендикулярного силовым линиям сечения электролита в ванночке, м^2 ;

$L_{\text{зон}}$ – расстояние между зондами, м ;

U_o и I_o – измеренные значения падения напряжения между зондами и ток в цепи установки соответственно, В, А.

ТКС определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 (\theta_2 - \theta_1)}, \quad (3.2)$$

где ρ_2 – удельное сопротивление при температуре θ_2 , Ом·м;

ρ_1 – удельное сопротивление при температуре θ_1 , Ом·м.

Для уменьшения погрешности измерения по данному способу необходимо применять вольтметр с высоким внутренним сопротивлением.

Исследования электрофизических характеристик с.-х. термолабильных сред проводились с использованием теории планирования эксперимента, что значительно сокращало число опытов. Эксперимент становился «активным», т. е. строился по специальным, научно обоснованным планам (схемам). Стратегия проведения эксперимента определялась результатами опытов, полученными на его предварительных этапах. На основании расчетных данных отыскивались математические зависимости между интересующими параметрами и влияющими на них факторами. При законе нормального распределения полученных данных, для обработки результатов экспериментов, можно воспользоваться методикой, изложенной в [83, с. 97–103; 84, с. 63–82; 85, с. 41–50; 86, с. 234–239; 87, с. 5–11].

В процессе исследований кислотность молока измерялась ионометром ЭВ-74, контрольные замеры проводились титрованием молока децинормальным раствором гидроксида натрия по методике, изложенной в [80, с. 259–263].

3.2 Математическая обработка результатов многофакторного эксперимента и построение математических моделей электрофизических характеристик сельскохозяйственных термолабильных сред

При проведении многофакторного эксперимента для каждой комбинации факторов (таблица 3.2) проводились расчеты зависимости удельного сопротивления от количества добавленной соли NaCl, кислотности обрата и его температуры. Расчеты проводились по измеренным значениям силы тока и напряжения в установке (схема показана на рис. 3.1).

Таблица 3.2

Значения факторов в условном и натуральном виде

Факторы	Кодовое обозначение	Средний уровень	Шаг варьирования	Значение уровней факторов соответственно условным ед.				
				–1,68	–1,0	0	+1,0	+1,68
Количество добавленной соли NaCl на литр обрата, г/л	x_1	1,68	1	0	0,68	1,68	2,68	3,36
Кислотность, °Т	x_2	40	15	14,8	25	40	55	65,2
Температура θ , °С	x_3	47	22	10	25	47	69	84

При исследовании электрических характеристик обрата использовалась теория планирования эксперимента [83, с. 97–103; 84, с. 63–82; 88, с. 58–85; 89, с. 63–76]. Поскольку предварительные исследования показали, что температурная зависимость удельного

сопротивления имеет нелинейный характер, то линейного приближения поверхности отклика для моделирования электрических характеристик обраты недостаточно. Поэтому для исследования влияния солесодержания, кислотности и температуры на удельное сопротивление обраты необходимо использовать планы второго порядка, а моделируемый процесс описывать уравнением регрессии второго порядка. На основании полученных данных отыскивались зависимости между удельным сопротивлением и влияющими на него факторами. Для обработки результатов экспериментов использовалась методика, изложенная в [83, с. 97–103].

При проведении эксперимента с k -факторами (в нашем случае $k = 3$) был использован полный центрально-композиционный рототабельный план типа 2^k [83, с. 97–103]. При таком рототабельном плане информация о поверхности отклика в точках, которые одинаково удалены от центра плана, одинакова для всех факторов. Центрально-композиционный план получаем путем расширения линейного плана первого порядка и перехода к плану второго порядка добавлением точек звездного плеча. Для получения независимой оценки коэффициентов регрессии применили ортогональное планирование. В эксперименте каждый фактор варьировался на пяти уровнях. В соответствии с требованиями ортогональности устанавливались следующие значения уровней в установленном масштабе: $-1,68$; $-1,0$; 0 ; $1,0$; $1,68$. В таблице 3.2 приведены основные уровни изменения факторов.

Полный факторный эксперимент, имеющий 8 точек с варьированием факторов на двух уровнях ($+1$; -1), сочетается с добавленными 7 точками, из которых одна центральная (0 ; 0 ; 0) и шесть звездных с плечами ($+1,68$; $-1,68$).

Количество повторностей опытов в i -й строке плана, при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и ошибке $\varepsilon = \pm 3 \cdot \sigma_u$, где σ_u – среднеквадратичное отклонение результатов опытов, в соответствии с источником [83, с. 16] принимаем равным трем.

Среднеквадратическое отклонение рассчитывается по формуле

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{L=1}^m (\rho_{\varepsilon L} - \rho_{\varepsilon \text{cp}})^2}{m - 1}}, \quad (3.3)$$

где $\rho_{\varepsilon L}$ – фактическое значение удельного сопротивления обрата, Ом·м;

$\rho_{\text{ср}}$ – среднее значение удельного сопротивления обрата в i -й строке плана, Ом·м;

m – количество повторностей опытов в i -й строке плана, ед.

При проведении анализа экспериментальных данных проверили однородность дисперсий с помощью критерия Кохрена:

$$G_{\text{оп}} = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sum_{L=1}^m \sigma_L^2}, \quad (3.4)$$

где σ_{max}^2 – наибольшая дисперсия в строках матрицы планирования эксперимента;

$\sum_{L=1}^m \sigma_L^2$ – сумма дисперсий в строках матрицы планирования эксперимента.

Расчетное значение критерия Кохрена составило $G_{\text{оп}} = 0,2077$, при $f_{G1} = m$ и $f_{G2} = N$ ($m = 3$, $N = 20$), табличное значение $G_{\text{опТаб}} = 0,2205$, что подтверждает гипотезу об однородности дисперсий.

Перед началом эксперимента исследуемые факторы кодировались. При кодировании факторов осуществляется линейное преобразование факторного пространства с переносом начала координат в центр эксперимента и введением новых единиц измерения по осям. Кодирование факторов проводится по формуле

$$x_u = \frac{x_u' - x_{0u}}{\varepsilon}, \quad (3.5)$$

где $u = 1 \dots N$;

N – число строк плана;
 x_u – кодированное значение фактора;
 x_u' – натуральное значение фактора;
 x_{ou} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;
 ε – натуральное значение интервала варьирования фактора.

В задачу построения многофакторной модели входило построение такого уравнения регрессии в p -мерном пространстве ($p = k + 1$), при котором отклонение результатов наблюдения i -го фактора для j -го опыта было бы минимальным. При математической обработке экспериментальных данных строилось уравнение регрессии. Вычисление коэффициентов уравнения, при варьировании исследуемых факторов, проводили в соответствии с методикой, изложенной в [83, с. 97–103]:

$$\rho_{pu} = b_{p0} + \sum_{i=1}^k b_{pi} x_{iu} + \sum_{\substack{i=1; \\ i < j}}^k b_{p\,ij} x_{iu} x_{ju} + \sum_{i=1}^k b_{p\,ii} x_{iu}^2, \quad (3.6)$$

где ρ_p – расчетное значение удельного сопротивления (отклика), Ом·м;

$b_{p0}, b_{pi}, b_{p\,ij}, b_{p\,ii}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

k – количество факторов, ед.;

x_{iu}, x_{ju} – независимые переменные факторы.

Тогда уравнение второго порядка (3.6) для трехфакторного эксперимента примет вид:

$$\begin{aligned} \rho_{pu} = & b_{p0} + b_{p1} x_{1u} + b_{p2} x_{2u} + b_{p3} x_{3u} + b_{p11} x_{1u}^2 + b_{p22} x_{2u}^2 + b_{p33} x_{3u}^2 + \\ & + b_{p12} x_{1u} x_{2u} + b_{p13} x_{1u} x_{3u} + b_{p23} x_{2u} x_{3u}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Расчет коэффициентов регрессии проводится по формулам [83, с. 102]:

при $i = 1, 2, \dots, k$,

$$b_{p0} = a_1 \cdot \sum_{u=1}^N \rho_{\text{э ср } u} - a_2 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \rho_{\text{э ср } u}; \quad (3.8)$$

$$b_{pi} = a_3 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \rho_{\text{э ср } u}; \quad (3.9)$$

$$b_{pii} = a_4 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \rho_{\text{э ср } u} + a_5 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \rho_{\text{э ср } u} - a_6 \cdot \sum_{u=1}^N \bar{y}_u \cdot \rho_{\text{э ср } u}, \quad (3.10)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – коэффициенты определены в соответствии с источником [83, с. 103];

$\rho_{\text{э ср } u}$ – среднее значение удельного сопротивления (отклика) в i -й строке плана, Ом·м.

При $i < j; i = 1, 2, \dots, k-1; j = 2, 3, \dots, k$,

$$b_{pij} = a_7 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \rho_{\text{э ср } u}, \quad (3.11)$$

где a_7 – коэффициент, определенный в соответствии с источником [83, с. 103].

В нашем случае, поскольку количество экспериментальных данных и объем выборки (повторностей опытов в i -й строке плана) относительно небольшие, распределение экспериментальных данных подчиняется t -распределению Стьюдента. Оно схоже с законом нормального распределения и зависит только от числа степеней свободы f , и при $f \rightarrow \infty$ приближается к нему. Проверка гипотезы о равенстве двух генеральных дисперсий $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, что в статистике называется нулевой гипотезой, по известным выборочным дисперсиям S_{LF}^2 и S_y^2 проводилась по F -критерию Фишера [83, с. 87]. Эта проверка показывает адекватности математического описания, или качества предсказания, при расчете удельного сопротивления

полученным уравнением регрессии. F -критерий Фишера представляет отношение дисперсии адекватности математической модели к дисперсии ошибки опытов и вычисляется по формуле

$$F = S_{LF}^2 / S_y^2, \quad (3.12)$$

где S_{LF}^2 – дисперсия адекватности математической модели;
 S_y^2 – дисперсия воспроизводимости опытов.

Для того чтобы принять гипотезу об адекватности разработанной модели, вычисленное значение F -критерия Фишера должно быть меньше табличного, которое выбирается по таблице в приложении 3 [83, с. 161] с учетом числа степеней свободы числителя и знаменателя выражения (3.12).

Число степеней свободы определяется разностью между количеством опытов и количеством коэффициентов регрессии, которые вычислены по результатам этих опытов независимо друг от друга

$$f_1 = \sum_{u=1}^N m_u - (k - 1) - (m_{15} - 1), \quad (3.13)$$

где m_u – число повторностей опытов в i -й строке плана;

m_{15} – число повторностей опытов при дублировании экспериментов одной точки плана ($u = 15 \dots 20$)

$$f_2 = m_{15} - 1. \quad (3.14)$$

Сумма квадратов разброса результатов численного эксперимента и сумма квадратов ошибки опытов, деленная на соответствующее число степеней свободы, дает дисперсию адекватности математической модели и дисперсию воспроизводимости опытов. Дисперсия адекватности математической модели определяется из выражения

$$S_{LF}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N m_u \cdot (\rho_{э\text{ ср } u} - \rho_{p\text{ } u})^2}{\sum_{u=1}^N m_u - k - 1 - (m_{15} - 1)}, \quad (3.15)$$

где ρ_{pi} – расчетное значение удельного сопротивления (отклика) в i -й строке плана, Ом·м.

Дисперсия, характеризующая воспроизводимости опытов, определяется из выражения

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=15}^N (\rho_{\text{э}15u} - \rho_{\text{э}cp15})^2}{m_{15} - 1}, \quad (3.16)$$

где $\rho_{\text{э}15u}$ – значение удельного сопротивления (отклика) в u -й строке плана при дублировании экспериментов одной точки плана ($u = 15 \dots 20$), Ом·м;

$\rho_{\text{э}cp15}$ – среднее значение удельного сопротивления (отклика) в u -х строках плана при дублировании экспериментов одной точки плана ($u = 15 \dots 20$), Ом·м.

После проверок значимости коэффициентов статистически незначимые коэффициенты (при их наличии) целесообразно исключить. Значимость коэффициентов оценивается на основании вычисления доверительных интервалов, в пределах которых должна находиться их истинная величина. Доверительный интервал Δb_{pi} , в пределах которого должно находиться истинное значение коэффициента, вычисляется на основании t -коэффициента Стьюдента, выбранного с учетом принятого числа степеней свободы, уровня значимости, а также дисперсии коэффициента:

$$\pm \Delta b_{pi} = \pm t \cdot S_{bi}, \quad (3.17)$$

где $S_{bi}^2 = \sqrt{S_y^2 / N}$.

Результаты математических расчетов по обработке результатов многофакторного эксперимента влияния солесодержания, кислотности

и температуры на удельное сопротивление обрата приводятся в приложении А (таблицы А.1 и А.2). Также в приложении А приводятся дисперсия адекватности ММ, дисперсия, характеризующая воспроизводимости опытов и рассчитанное численное значение F -критерия Фишера, которые подтверждают гипотезу об адекватности разработанной модели.

Численные значения коэффициентов регрессии b_{pi} и доверительного интервала Δb_{pi} , в пределах которого должно находиться истинное значение коэффициентов регрессии, представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Результаты расчета коэффициентов b_{pi} уравнения регрессии (3.7)

Коэффициенты b_{pij} уравнения регрессии (3.7)		Доверительный интервал Δb_{pij}
b_{p0}	0,847	0,006
b_{p1}	−0,1479	0,0040
b_{p2}	−0,0771	0,0040
b_{p3}	−0,2951	0,0040
b_{p11}	0,0246	0,0035
b_{p22}	−0,0054	0,0035
b_{p33}	0,0609	0,0035
b_{p12}	0,0238	0,0052
b_{p13}	0,0545	0,0052
b_{p23}	0,0265	0,0052

Уравнение регрессии второго порядка для трехфакторного эксперимента (3.7) с учетом коэффициентов, приведенных в таблице 3.3, примет вид:

$$\begin{aligned} \rho_{pu} = & 0,847 - 0,1479 \cdot x_{1u} - 0,0771 \cdot x_{2u} - 0,2951 \cdot x_{3u} + \\ & + 0,0246 \cdot x_{1u}^2 - 0,0054 \cdot x_{2u}^2 + 0,0609 \cdot x_{3u}^2 + \\ & + 0,0238 \cdot x_{1u}x_{2u} + 0,0545 \cdot x_{1u}x_{3u} + 0,0265 \cdot x_{2u}x_{3u}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Для интерпретации установленной закономерности коэффициенты уравнения (3.18) преобразуются к именованным величинам [83, с. 123–125]:

– при преобразовании линейных членов уравнения:

$$b_{pi}x_{iu} = \frac{b_{pi}}{\varepsilon_i}x'_{iu} - \frac{b_{pi}}{\varepsilon_i}x_{0iu}, \quad (3.19)$$

где x_{iu} – кодированное значение фактора;

x'_{iu} – натуральное значение фактора;

x_{0iu} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

ε_i – натуральное значение интервала варьирования фактора;

– при преобразовании членов уравнения, содержащих взаимодействующие факторы:

$$b_{pij}x_{iu}x_{ju} = \frac{b_{pij}}{\varepsilon_i\varepsilon_j}(x'_{iu}x'_{ju} - x'_{iu}x_{0ju} - x'_{ju}x_{0iu} + x_{0iu}x_{0ju}), \quad (3.20)$$

где x_{ju} – кодированное значение фактора;

x'_{ju} – натуральное значение фактора;

x_{0ju} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

ε_j – натуральное значение интервала варьирования фактора;

– при преобразовании квадратичных членов уравнения:

$$b_{pii}x_{iu}^2 = \frac{b_{pii}}{\varepsilon_i^2}(x_{iu}^2 - x'_{iu}x_{0iu} + x_{0iu}^2). \quad (3.21)$$

В результате преобразования коэффициентов уравнения (3.18) к именованным величинам эмпирическая зависимость влияния соли, добавленной к обрату, его кислотности и температуры на удельное сопротивление обрата ρ_{pu} примет вид:

$$\begin{aligned} \rho_{pu} = & 2,693\,483\,738 - 0,410\,462\,852 \cdot x'_{1u} - 0,009\,641\,356 \cdot x'_{2u} - \\ & - 0,032\,606\,998 \cdot x'_{3u} + 0,024\,624\,079 \cdot x'^2_{1u} - 0,000\,024\,17 \cdot x'^2_{2u} + \\ & + 0,000\,125\,831 \cdot x'^2_{3u} + 0,001\,586\,354 \cdot x'_{1u}x'_{2u} + \\ & + 0,002\,475\,782 \cdot x'_{1u}x'_{3u} + 0,000\,080\,188 \cdot x'_{2u}x'_{3u}, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где x'_{1u} — количество добавленной соли NaCl, г/л,

x'_{2u} — кислотность, °Т,

x'_{3u} — температура обрата, °С.

Математическая обработка и анализ результатов многофакторного эксперимента позволили выявить влияние исследуемых факторов (солесодержания, кислотности и температуры) на величину удельного сопротивления обрата, получить их математические выражения в зависимости от значения факторов и установить зависимость изменения удельного сопротивления обрата от температуры, концентрации хлоридов и кислотности. Исследованные зависимости удельного сопротивления от различной концентрации NaCl, различной кислотности и температуры обрата, а также при различных концентрациях NaCl и различных кислотностях обрата представлены на рис. 3.2–3.6.

При проведении многофакторного эксперимента исследовалось изменение кислотности обрата, при его скисании в диапазоне от 14,8°Т до 65,2°Т. Увеличение кислотности обрата в этом диапазоне приводит к изменению, как удельного сопротивления, так и наклона кривой $\rho_t = f(\theta)$. Наклон кривой $\rho_t = f(\theta)$ характеризует ТКС обрата. Форма кривых $\rho_t = f(\theta)$ показывает, что удельное

сопротивление и ТКС имеют нелинейную температурную зависимость (см. рис. 3.5). Так, для свежего обрата при минимальной кислотности 14,8°Т удельное сопротивление имеет наибольшую величину. При скисании обрата его удельное сопротивление уменьшается. Аналогичная закономерность наблюдается и при увеличении концентрации NaCl. Без дополнительного добавления соли NaCl удельное сопротивление имеет наибольшую величину. К хлоридам Cl^- , Na^+ , K^+ , которые естественным образом присутствуют в молоке и которые корова получает с пищей, дополнительно добавляется соль NaCl, например, в виде концентрированного рассола. При увеличении концентрации NaCl уменьшается удельное сопротивление обрата (см. рис. 3.6).

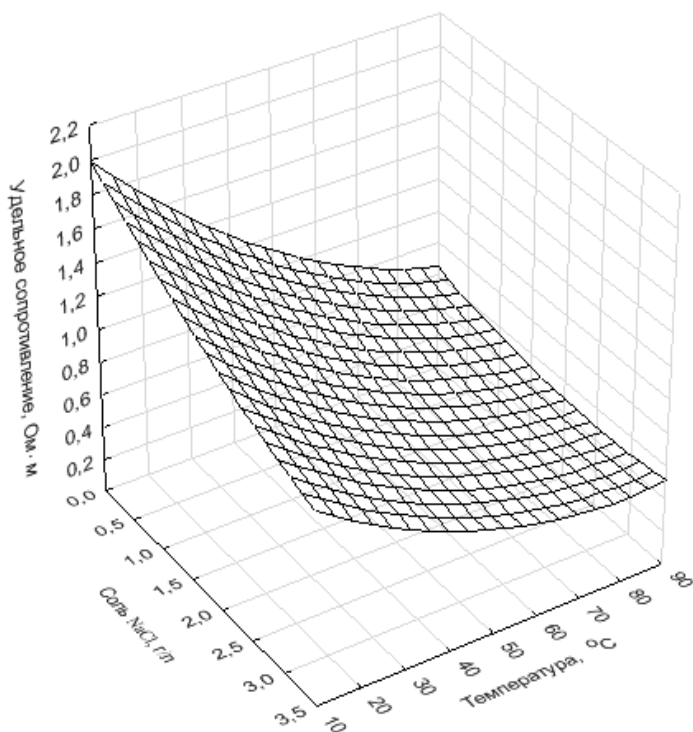


Рис. 3.2. Графическая зависимость удельного сопротивления обрата от температуры и изменения концентрации NaCl

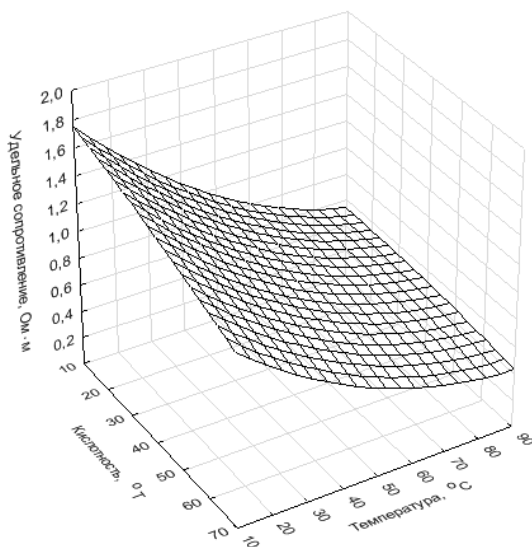


Рис. 3.3. Графическая зависимость удельного сопротивления обраты от температуры и кислотности

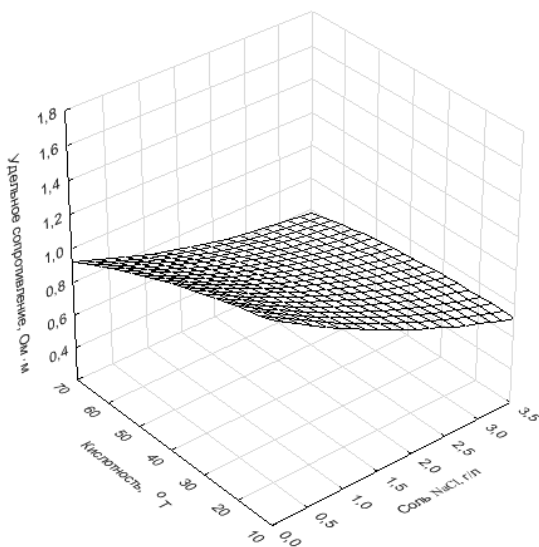


Рис. 3.4. Графическая зависимость удельного сопротивления обраты от изменения концентрации NaCl и кислотности

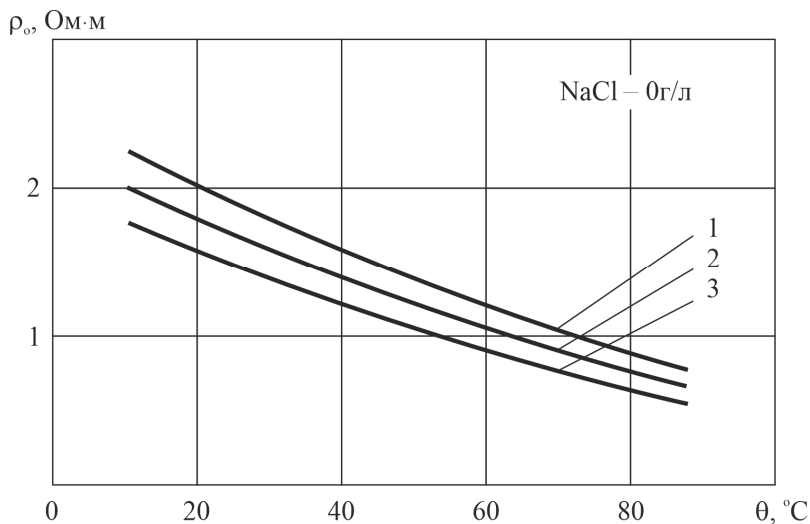


Рис. 3.5. Графики зависимости удельного сопротивления обраты от температуры при различной кислотности без добавления соли NaCl:
1 — 14,8 °Т, 2 — 40 °Т, 3 — 65,2 °Т

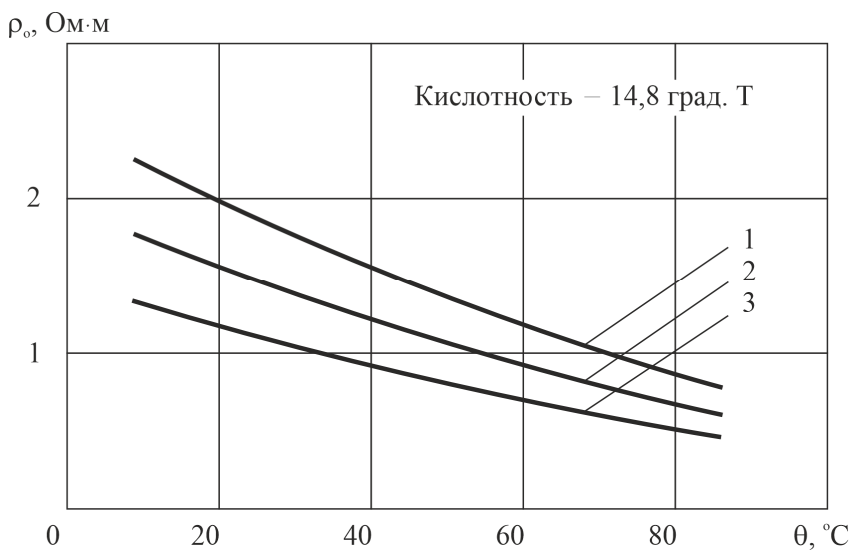


Рис. 3.6. Графики зависимости удельного сопротивления обраты от температуры при изменении концентрации NaCl для кислотности 14,8 °Т:
1 — 0 г/л NaCl, 2 — 1,68 г/л NaCl, 3 — 3,36 г/л NaCl

Поскольку при практической эксплуатации ЭНУ значение температурной зависимости удельного сопротивления среды, проходящей тепловую обработку, может отличаться от значения температурной зависимости удельного сопротивления, на которую рассчитан ЭЭН, то мощность ЭНУ с ЭЭН может отличаться от расчетной. Соответственно, существует необходимость корректировки удельного сопротивления обрабатываемой среды. Перед термообработкой, используя полученную зависимость (3.18), есть возможность значение удельного сопротивления обрата снизить на требуемую величину путем добавления в него соли NaCl. Добавленное количество NaCl в дальнейшем можно учитывать при формировании рациона кормления животных. В рационе теленка до шестимесячного возраста в сутки должно быть 10–16 л жидкой кормосмеси [90, с. 35–43], при приготовлении которой необходимо 4,0–6,4 л обрата и 30–48 граммов соли NaCl.

Добавление соли NaCl позволяет корректировать удельное сопротивление в достаточно широких пределах. Так, добавление 3,36 г/л соли NaCl в обрат кислотностью 14,8 °Т и значением температуры 10 °С позволяет повысить мощность ЭНУ с ЭЭН на 42 %. Это позволяет корректировать мощность ЭЭН при изменении удельного сопротивления обрата и вести термообработку при оптимальных параметрах.

Обобщая результаты проведенных исследований электрофизических характеристик обрата, можно отметить следующее:

- температурная зависимость удельного сопротивления обрата имеет нелинейный характер изменения, при этом на полученную зависимость оказывают влияние кислотность обрата и содержание в нем соли NaCl;

- полученную эмпирическую зависимость удельного сопротивления обрата можно использовать при проектировании электродных систем ЭЭН для нагрева обрата.

3.3 Обоснование допустимых электрических параметров электродных электронагревателей для тепловой обработки сельскохозяйственных термолабильных сред

Анализ процесса тепловой обработки с.-х. термолабильных сред показывает, что процесс представляет собой совокупность электронагрева

и электрохимических реакций [91, с. 192–194]. Основными факторами, определяющими удельный вес каждой из двух составляющих, являются: температура обрабатываемой среды, род тока, напряженность электрического поля, или плотность тока, количество протекающего электричества и водородный показатель [5, с. 5–66]. Применение постоянного электрического тока определяет расход электрической энергии на электрохимические реакции. При переменном токе количество электричества на электрохимические реакции существенно уменьшается.

Электрическая обработка на переменном токе увеличивает степень диссоциации электролита и уменьшает миграцию ионов. Окисление или восстановление ионов на электродах определяется результирующим током этих реакций. Переменный электрический ток устраняет концентрационную поляризацию, и в средах с нормальным *pH* доля электрохимических реакций незначительна. Результаты исследований [5, с. 5–66] показывают, что обработка переменным и постоянным током не приводит к каким-либо существенным изменениям в проведенных химических анализах. В пробах отсутствуют: формальдегид, изопропанол, бутанол-1, найдены следы ацетальдегида. Другие химические показатели представлены в таблице 3.4. Однако электрообработка в средах с выраженным *pH* приводит к изменению всех изученных показателей по сравнению с контролем: (для измельченной и увлажненной соломы с 4 %...5 % Na_2CO_3 и 1,5 %...2,0 % NaCl) растет выделение формальдегида и ацетальдегида, метанола и ацетона, наблюдается появление легких хлорированных алифатических углеводородов.

На протекание электрохимических реакций при электротепловой обработке влияет напряженность электрического поля или плотность тока между электродами ЭЭН. Известна зависимость допустимых значений плотности тока от величины удельного сопротивления обрабатываемой среды [2, с. 52], которая определяет максимально допустимую плотность тока, при превышении которой возможно разложение воды на водород и кислород.

При электротепловой обработке возможен вынос материала электрода в обрабатываемую среду. При превышении предельно допустимых концентраций металлов в обрабатываемой среде возможно появление неприятного металлического привкуса, ржавого цвета на поверхностях, с которыми контактировала обрабатываемая

среда, мутности рыжего оттенка или осадка. Предельно допустимые концентрации металлов в воде исследованы достаточно хорошо и представлены в санитарных правилах и нормах [92].

Таблица 3.4

Сравнение результатов химического анализа зерна, соломы и сока картофеля до и после обработки электрическим током [5, с. 5–66]

Химические ингредиенты и их содержание, мг/кг	Название продукта	Вид обработки			
		без обработки	переменный ток 50 Гц	постоянный ток (без мембраны)	электрохимическая коагуляция
Нитраты (NO ³⁻)	Ячмень	н.о.*	н.о.*	6.2	—
	Солома	н.о.*	н.о.*	н.о.*	—
	Сок картофеля	н.о.	—	—	н.о.*
Хлориды (Cl ⁻)	Ячмень	2456	1522	2903	—
	Солома	2268	4112	3543	—
	Сок картофеля	934	—	—	1101
Метанол	Ячмень	2,7	н.о.	3,6	—
	Солома	45	2,3	17	—
	Сок картофеля	0,020	—	—	0,013
Этанол	Ячмень	3533	4711	2489	—
	Солома	100	106	78	—
	Сок картофеля	0,05	—	—	0,01
Ацетон	Ячмень	38,3	33,3	20,0	—
	Солома	5,7	7,6	7,6	—
	Сок картофеля	5,6	—	—	15,7
Фенолы	Ячмень	1,01	1,33	0,89	—
	Солома	—	—	—	—
	Сок картофеля	1,10	—	—	0,73

* – не обнаружены.

При электротепловой обработке материал электродов ЭЭН, помимо обеспечения надежного подвода электрического тока к обрабатываемой среде, должен обеспечивать высокую коррозионную устойчивость материала электрода. Влияние плотности тока на загрязнение среды материалом разрушения электродов исследовалось рядом авторов [36, с. 67–71; 93, с. 68–73; 94, с. 209]. Зависимость скорости эрозии анода от плотности тока и материала электродов [93, с. 71] (рис. 3.7) показывает, что скорость эрозии лавинообразно возрастает с увеличением плотности тока, и наиболее сильному разрушению подвержены электроды из нелегированной стали Ст3. Легированная сталь 12Х18Н9Т электрохимической коррозии подвержена существенно ниже. При электротепловой обработке токами промышленной частоты электрохимическое разрушение электродов ниже, чем на постоянном токе примерно в 100 раз [94, с. 209]. Соответственно, при обеспечении требуемой плотности тока на электродах возможно проведение термообработки с учетом обеспечения требований санитарных правил и норм [92].

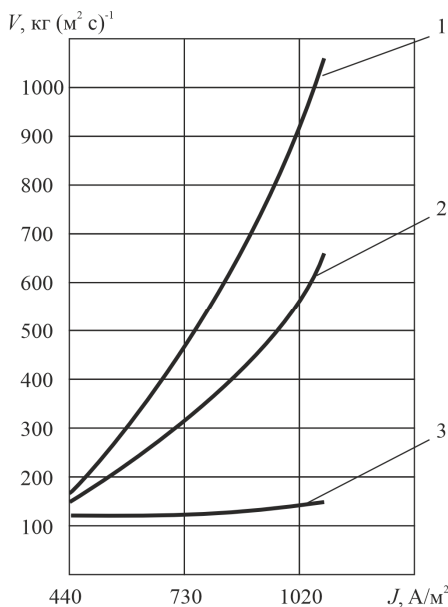


Рис. 3.7. Графики зависимости скорости эрозии анода от плотности тока и материала электродов [93, с. 71]:

1 – Ст3; 2 – 12Х18Н9Т; 3 – графитовые электроды

При обработке жидких сред, таких как молоко и соки, остро стоит проблема уменьшения контактного сопротивления на границе электрод–среда, которое вызывает перегрев среды у электродов и приводит к ухудшению качества обрабатываемой среды и росту отложений на электродах. Согласно исследованиям Е.П. Нания [23, с. 1–18], при электродном электронагреве выделяемая мощность в единицу объема изменяется как по длине электронагревателя, в связи с увеличением температуры и проводимости, так и в сечении межэлектродного пространства (температура в центре потока и возле электродов будет различной). Это один из факторов, который вызывает перегрев обрабатываемой среды у электродов и приводит к увеличению количества отложений на электродах. Им установлено, что на количество отложений существенно влияют два фактора: скорость движения обрабатываемой среды и плотности тока в межэлектродном пространстве [23, с. 11].

Допустимые электрические параметры ЭЭН, при тепловой обработке с.-х. термолабильных сред с учетом обеспечения требований санитарных правил и норм, определяются исходя из электрохимических процессов, протекающих под воздействием электрического тока. При обработке переменным током среды с нормальным pH необходимо вести нагрев при плотности тока (напряженности электрического поля), не превышающей допустимые значения.

Исследование электрофизических характеристик обраты показало:

- наибольшее влияние на его удельное сопротивление оказывает изменение кислотности, концентрации хлоридов и температуры [79, с. 35–40].

- при повышении кислотности обраты, концентрации хлоридов и температуры его удельное сопротивление уменьшается по нелинейной зависимости [79, с. 40];

- корректировка мощности ЭНУ с ЭЭН при подогреве обраты для выпойки телят может осуществляться путем добавления соли $NaCl$, с последующей корректировкой ее количества в рационе их кормления [79, с. 38–40];

- допустимые технологические параметры ЭЭН, для тепловой обработки с.-х. термолабильных сред, такие как плотность тока и скорость движения обраты в межэлектродном пространстве, определяются исходя из электрохимических процессов, протекающих под воздействием электрического тока и отложений, образующихся на электродах [79, с. 35; 91, с. 192–194].

ГЛАВА 4

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ И ЗОНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ

Основным технологическим требованием, предъявляемым к ЭН в ЭНУ, является обеспечение равномерного или заданного распределения температуры (или мощности) в объеме обрабатываемой среды. Использование ЭЭН снижает инерционность, энерго- и материалоемкость, обеспечивает высокий тепловой КПД и готовность к работе, увеличивает срок службы ЭН. Широкое использование ЭЭН сдерживается рядом причин, одной из которых является отсутствие необходимых методик расчета основных электротепловых схем ЭЭН. Многообразие типов и конструкций ЭЭН, а также назначений ЭНУ, в которых они могут использоваться, исключает возможность разработки единой методики расчета ЭЭН. Поэтому основной целью этой главы является разработка методик расчета основных электротепловых схем ЭЭН.

Правильный выбор электротепловой схемы ЭЭН позволяет оптимально вести электронагрев при минимуме затрат и капиталовложений. Непроточную электротепловую схему при разработке ЭНУ целесообразно использовать для технологических процессов, где непрерывность цикла нагрева не является обязательным условием [41, с. 9–11]. Это позволит значительно упростить процесс регулирования и понизить стоимость установки.

При использовании проточных ЭЭН для ведения нагрева с оптимальной плотностью тока, необходимо проводить их секционирование. Наиболее простой вариант секционирования – изменение расстояния между электродами. Его преимущества – в несложной электродной системе.

При нагреве сред с сильно выраженной зависимостью удельного сопротивления от температуры необходимо значительно изменять поперечное сечение канала протекания среды в нагревателе на выходе относительно сечения входа. Однако при нагреве обрабатываемых сред с высокой вязкостью или когда есть необходимость повысить скорость движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, значительное изменение межэлектродного

расстояния и ширины электродов не всегда конструктивно возможно из-за возникновения застойных зон в межэлектродном пространстве ЭЭН. В таких случаях целесообразно проводить как секционирование путем изменения межэлектродного расстояния и ширины электродов, так и зонирование путем последовательного соединения отдельных участков секций (зон).

При нестабильности условий работы ЭНУ, когда возможно изменение электротепловых характеристик обрабатываемых сред, питающего напряжения или образование отложений на электродах, могут нарушаться требования технологического процесса к термообработке, что повышает вероятность возникновения аварийных режимов работы. В таких случаях целесообразно использовать ЭЭН-Д [11, с. 15–20].

4.1 Методика расчета непроточных электродных электронагревателей-датчиков с плоскопараллельной многозонной электродной системой

В 2021 г. на фермах КРС в Республике Беларусь выращивалось 1 млн. 346 тыс. гол. телят, рацион кормления которых до 6 месяцев включает 4,0–6,6 л. обрат. При фермерском ведении СХП возрастает роль относительно небольших ферм КРС (до 100 гол.). При оснащении таких ферм необходима децентрализация теплоснабжения в сочетании с невысокой стоимостью оборудования при его высоком КПД и надежности. Применительно к нагревательным установкам, кроме того, необходима высокая пожаробезопасность. Нагревательный блок ЭЭН-Д по стоимости на порядок ниже стоимости ТЭНов той же установленной мощности, имеет высокий КПД, пожаробезопасен. Простая схема управления позволяет с заданной точностью контролировать режим термообработки и исключить аварийные режимы. С учетом вышеизложенного целесообразна разработка ЭЭН-Д для подогрева обрат. для фермы КРС на 100 гол.

Согласно статистике в год от 100 гол. КРС выход составляет 90 гол. телят. Отелы происходят в основном с середины сентября по середину мая. При этом на ферме одновременно необходимо выпаивать до 30 гол. телят. Нормы подогреваемого обрат. определяется

из рациона кормления [90, с. 35–43]. Мощность ЭЭН зависит от количества подогреваемого обрат (150 кг), времени нагрева, определяемого режимом кормления и расписанием работы обслуживающего персонала, и значения конечной температуры нагрева $\theta_{\text{ск}}$, которое определяется с учетом технологических требований (38 °С) к процессу кормления телят молоком и заменителями молока (ЗЦМ) [90, с. 35–43], а также температурных потерь в процессе раздачи молока или ЗЦМ.

Электротепловые процессы, протекающие в непроточных ЭЭН-Д с зонированной системой электродов, описываются нелинейными дифференциальными и интегральными уравнениями (2.9)...(2.42) которые решали численно методом конечных разностей.

При расчете ЭЭН-Д определяется суммарное время нагрева среды τ_p . Оно должно быть меньше заданного T_Z , т. е. между τ_p и T_Z разность по абсолютной величине должна быть меньше погрешности расчета ε :

$$|\tau_p - T_Z| = F(\Pi) < \varepsilon, \quad (4.1)$$

где $F(\Pi)$ – функция, определяющая расчет ширины электродов ЭЭН-Д по времени нагрева, с.

При решении уравнения (4.1) можно воспользоваться методом Ньютона, определяя при этом новое $(n+1)$ -е приближение ширины электродов:

$$\Pi_{n+1} = \Pi_n - F(\Pi_n) / F'(\Pi_n), \quad (4.2)$$

где производную $F'(\Pi_n)$, в свою очередь, можно определить численно, используя достаточно малое приращение ширины электродов $d\Pi$:

$$F'(\Pi_n) = (F(\Pi_n + d\Pi) - F(\Pi_n)) / d\Pi. \quad (4.3)$$

Блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров ЭЭН-Д приведена на рис. 4.1, на рис. 4.2 приведена блок-схема алгоритма расчета функции F .

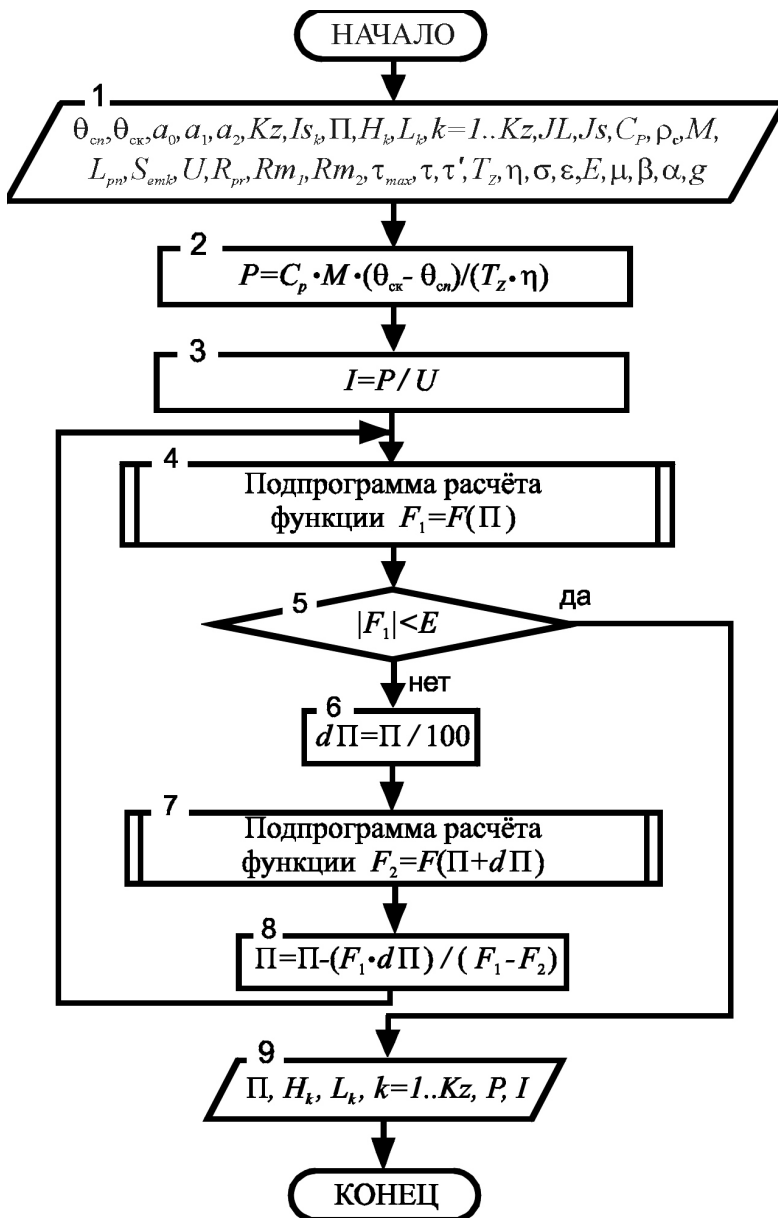


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма расчета ширины электродов непроточного ЭЭН-Д

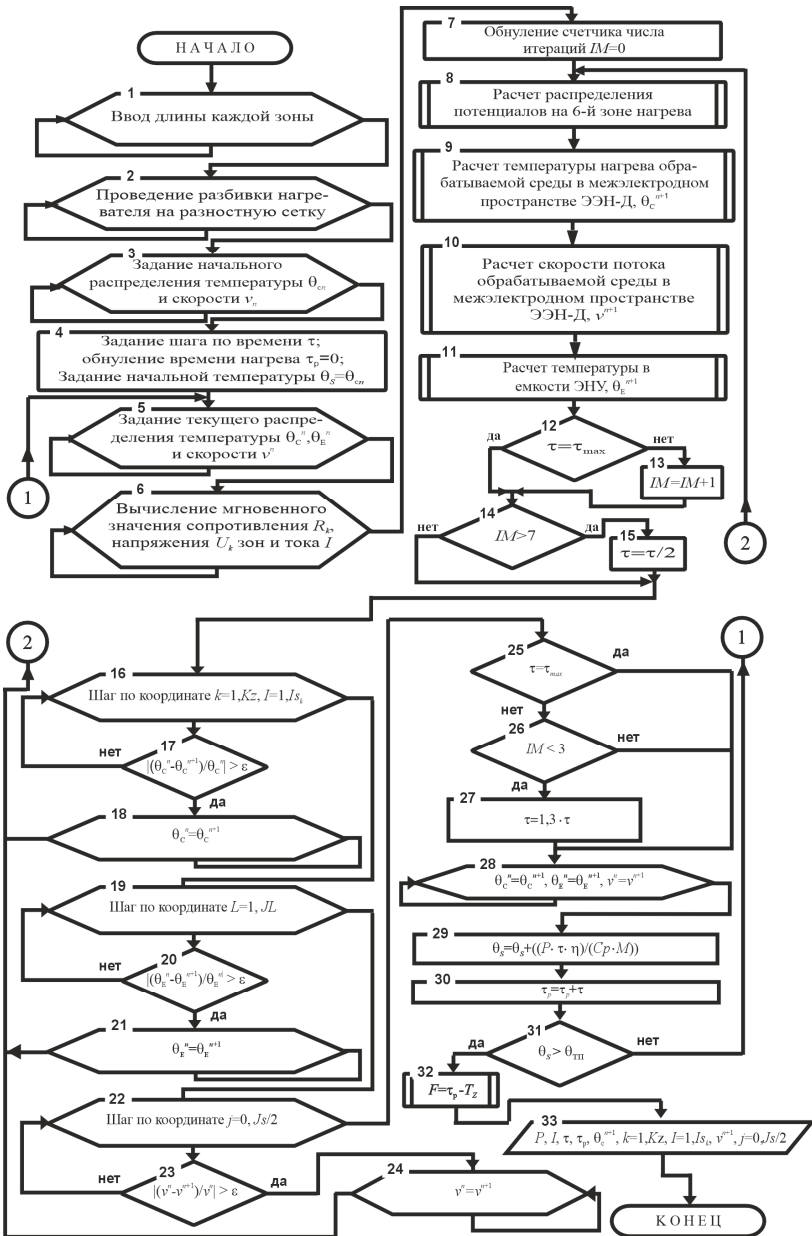


Рис. 4.2. Блок-схема алгоритма расчета функции F

В приведенных блок схемах алгоритмов приняты следующие обозначения:

θ_{cn} – начальная температура обрабатываемой среды, °C;

θ_{ck} – заданная температура нагрева обрабатываемой среды, °C;

θ_s – среднеинтегральная температура обрабатываемой среды, °C;

θ_n – начальная температура обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, °C;

v_n – начальная скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, м/с;

U_k – напряжение на k -й зоне нагрева, В;

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

M – масса обрабатываемой среды, кг;

Kz – количество зон нагрева непроточного ЭЭН-Д;

Is_k – число секций в зоне k -й зоне;

Π – ширина электродов, м;

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

L_k – длина электродов на k -й зоне нагрева, м;

Js – количество слоев по оси y в каждой секции;

JL – количество слоев разностной сетки по высоте емкости (в противоположном направлении оси y);

L_{pn} – расстояние от ЭЭН-Д до дна емкости, м;

S_{emk} – площадь поперечного сечения емкости с обрабатываемой средой, м²;

τ_p – время нагрева, с;

T_z – заданное время нагрева обрабатываемой среды, с;

σ – произвольный вещественный параметр, при расчете разностными методами;

ε – погрешность вычислений температуры и скорости обрабатываемой среды;

E – приращение ширины электродов;

IM – число итераций;

τ' – итерационный параметр вычисления распределения потенциалов электрического поля;

μ – коэффициент динамической вязкости, Па · с;

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

g – ускорение свободного падения, м/с²;
 α – коэффициент диффузии, м²/с.
 P – мощность ЭЭН-Д, Вт;
 I – ток ЭЭН-Д, А;
 $d\Pi$ – приращение ширины электродов ЭЭН-Д, м;
 θ_c^n – температуры обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;
 a_0, a_1, a_2 – коэффициенты уравнения $\rho_t = a_0 + a_1 \cdot \theta_c^n + a_2 \cdot \theta_c^{n^2}$, определяющие зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды от температуры ее нагрева;
 θ_E^n – температура обрабатываемой среды в емкости на n -м расчетном (предыдущем) шаге, °С;
 v^n – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на n -м расчетном (предыдущем) шаге, м/с;
 θ_c^{n+1} – температура обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;
 θ_E^{n+1} – температура обрабатываемой среды в емкости на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;
 v^{n+1} – скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве на $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, м/с.

4.2 Методики расчета основных электротепловых схем проточных электродных электронагревателей с секционированными и многозонными электродными системами

Для ЭЭН с переменным сечением межэлектродного пространства и для многозонного ЭЭН [42, с. 17–25; 95, с. 16–22] все электротепловые процессы, происходящие на i -м элементарном участке любой зоны в статике, описываются дифференциальным уравнением:

$$C_p \cdot G \frac{d\theta_c}{dx} = U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta / (\rho_t(\theta_c) \cdot H_i), \quad (4.4)$$

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

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

U_i – напряжение питания на i -й секции электронагревателя, В.

При расчете конструктивных параметров ЭЭН с секционированной системой электродов, приведенной на рис. 2.2, по температуре обрабатываемой среды на входе электронагревателя $\theta_{c, \text{вх}}$ определяют удельное сопротивление $\rho_t(\theta_c)$. Затем по зависимости допустимых значений плотности тока в межэлектродном пространстве от удельного сопротивления обрабатываемой среды $J_{\text{доп}} = f(\rho_t(\theta_c))$ рассчитывают допустимую плотность тока $J_{\text{доп}}$. После этого определяют расстояние H_i между электродами для первой секции нагревателя:

$$H_i = \frac{K_3 \cdot U}{J_{\text{доп}} \cdot \rho_t(\theta_c)}, \quad (4.5)$$

где K_3 – коэффициент запаса по допустимой плотности тока (1,05...1,10).

Далее межэлектродное расстояние H_i для последующих секций длиной h рассчитывают аналогично, при этом температуру обрабатываемой среды определяют исходя из уравнения (4.4). Так как подобный расчет требует большого количества вычислений, то наиболее целесообразно проводить его на ЭВМ, при этом дифференциальное уравнение (4.4) решать численно, методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Для этого указанное дифференциальное уравнение необходимо привести к следующему виду:

$$\frac{d\theta_c}{dx} = \frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G}. \quad (4.6)$$

Тогда температуру обрабатываемой среды для последующих секций $\theta_{c, i+1}$ следует рассчитывать по формуле

$$\theta_{ci+1} = \theta_{ci} + \Delta\theta_{ci}. \quad (4.7)$$

Приращение температуры обрабатываемой среды на каждом шаге по длине ЭЭН $\Delta\theta_{ci}$ будет определяться по формуле

$$\Delta\theta_{ci} = \frac{1}{6}(k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}). \quad (4.8)$$

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

$$k_{1i} = h \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{ci}) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (4.9)$$

$$k_{2i} = h \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{ci} + k_{1i}/2) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (4.10)$$

$$k_{3i} = h \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{ci} + k_{2i}/2) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right); \quad (4.11)$$

$$k_{4i} = h \left(\frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{ci} + k_{3i}) \cdot H_i \cdot C_p \cdot G} \right). \quad (4.12)$$

Расчет проводится до тех пор, пока очередное расчетное значение θ_{ci+1} не превысит заданной температуры обрабатываемой среды на выходе из нагревателя $\theta_{с.вых}$. Алгоритм приведенного расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с секционированной электродной системой представлен на рис. 4.3 [96].

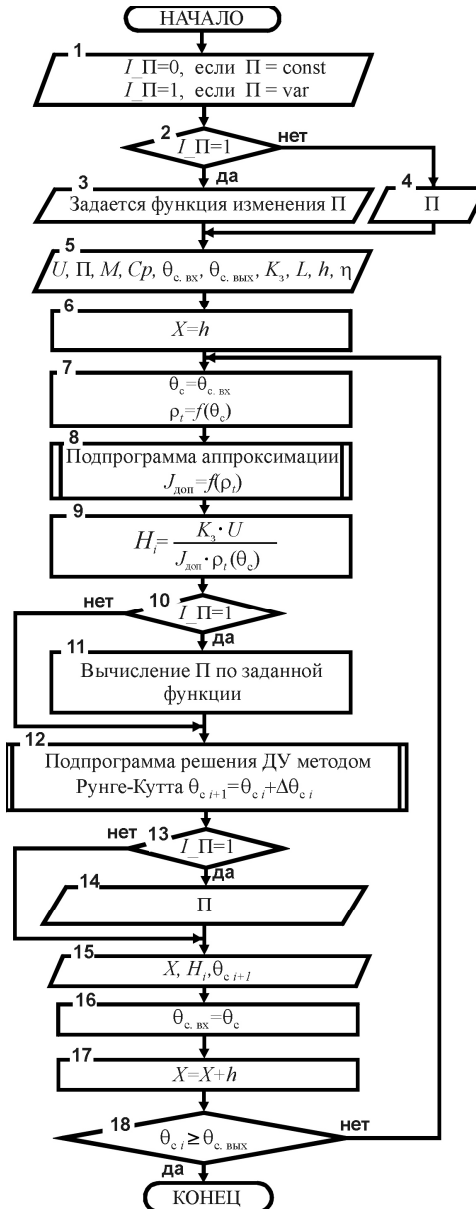


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с секционированной электродной системой

При описании электротепловых процессов, происходящих в статике, в проточном ЭЭН с зонированной электродной системой (см. рис. 2.3) к дифференциальному уравнению (4.4), записанному для i -го участка (секции) любой k -й зоны, необходимо добавить еще уравнения, описывающие электрическую связь между k -ми последовательно соединенными зонами обрабатываемой среды [10, с. 52–55; 95, с. 16–22]:

$$U = \sum_{k=1}^N U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \quad (4.13)$$

$$I = C_p \cdot G \cdot (\theta_{\text{с.вых}} - \theta_{\text{с.вх}}) / (\eta \cdot U); \quad (4.14)$$

$$R_k = \frac{\int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H_k dx}{\int_0^{L_k} \Pi_k dx \cdot L_k^2}, \quad (4.15)$$

где H_k – межэлектродное расстояние k -й зоны электронагревателя, м;
 Π_k – ширина электродов k -й зоны электронагревателя, м.

В процессе решения полученной системы уравнений необходимо следить за тем, чтобы ток во всех последовательно соединенных зонах обрабатываемой среды оставался постоянным и равнялся полученному из уравнения (4.14). Кроме того, при расчете параметров таких электродных электронагревателей следует анализировать изменения произведения $J_{\text{доп}} \cdot \rho_t(\theta_c)$ в интервале от значений температуры среды на входе $\theta_{\text{с.вх}}$ и на выходе ЭЭН $\theta_{\text{с.вых}}$. Этот анализ необходим для уточнения расчета его параметров с начала или с конца нагревателя. Несмотря на то, что в расчете проточных ЭЭН с секционированной электродной системой произведение $J_{\text{доп}} \cdot \rho_t(\theta_c)$ также было определяющим при расчете межэлектродного расстояния H_i по уравнению (4.5), анализ его изменения не проводился. Это объясняется тем, что межэлектродное расстояние H_i

определялось по длине нагревателя с достаточно малым шагом h , и поэтому его значение в начале и в конце секций практически одинаково. Кроме этого, в уравнении (4.5) в числителе присутствует коэффициент запаса по допустимой плотности тока K_3 , значение которого всегда больше 1, что способствует увеличению межэлектродного расстояния h и, соответственно, позволяет в этом случае даже при некотором различии произведений $J_{доп} \cdot \rho_t(\theta_c)$ на концах секций не учитывать направление расчета нагревателя – от входа к выходу, или наоборот. Для проточных ЭЭН с зонированной электродной системой этот анализ необходим, так как напряжение U_k на каждой достаточно протяженной зоне будет определяться по значению межэлектродного расстояния k -й зоны H_k и произведению $J_{доп} \cdot \rho_t(\theta_c)$ в начале зоны или в ее конце по формуле

$$U_k = H_k \cdot J_{доп} \cdot \rho_t(\theta_c) / K_3. \quad (4.16)$$

Если анализ произведения $J_{доп} \cdot \rho_t(\theta_c)$ показывает, что она монотонно возрастает при изменении значений температуры от $\theta_{с.вх}$ до $\theta_{с.вых}$, то проводить расчет необходимо, начиная с начала нагревателя, так как в этом случае он будет обеспечивать выполнение условия – расчетная плотность тока j на любом элементарном участке нагревателя будет меньше или равна допустимой плотности тока $J_{доп}$, т. е. $J \leq J_{доп}$. Если $J_{доп} \cdot \rho_t(\theta_c)$ монотонно убывает при указанном изменении температуры, то расчет необходимо вести с конца нагревателя.

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

Алгоритм расчета конструктивных параметров проточного электронагревателя с зонированной электродной системой представлен на рис. 4.4 [97]. При этом для упрощения принято, что ширина

электродов Π_k и межэлектродное расстояние H_k остаются постоянными и равными для всех последовательно соединенных зон, что обеспечивает наилучшую равномерность протекания обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве и, соответственно, ее нагрева. Функция $J_{\text{доп}} \cdot \rho_t(\theta_c)$ принята монотонно изменяющейся, так как на практике такие случаи встречаются наиболее часто.

В приведенном алгоритме (рис. 4.4) приняты следующие обозначения:

x – текущая длина расчетной k -й зоны ЭЭН, м;

U_k – напряжение k -й последовательно соединенной зоны, В;

P_k – мощность k -й последовательно соединенной зоны, Вт;

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

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

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

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

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

L_3 – полная длина электродного электронагревателя, м;

U_s – суммарное напряжение на k -рассчитанных зонах, В.

При расчете проточного ЭЭН с зонированной электродной системой по приведенному алгоритму в случае превышения напряжения U_k , полученного по формуле (4.16) для последнего расчетного участка (блок 9) над разностью $(U - U_s)$, напряжение на нем принимают равным этой разности (блок 11), что в данном случае занижает истинное значение плотности тока на элементарных участках (секциях) расчетной зоны по отношению к допустимому, что, в свою очередь, приводит к завышению габаритных размеров последней расчетной зоны электронагревателя. Поэтому в данном случае, с целью уменьшения габаритных размеров, целесообразно изменять ширину электродов Π_k и межэлектродное расстояние H_k до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение. Анализ уравнения (4.16) показывает, что количество последовательно соединенных зон в ЭЭН с зонированной электродной системой будет зависеть от межэлектродного расстояния H_k , допустимой плотности тока в межэлектродном пространстве $J_{\text{доп}}$ и удельного сопротивления обрабатываемой среды $\rho_t(\theta_c)$. При этом,

чем меньше эти параметры, тем большее количество последовательно соединенных зон будет содержать нагреватель.

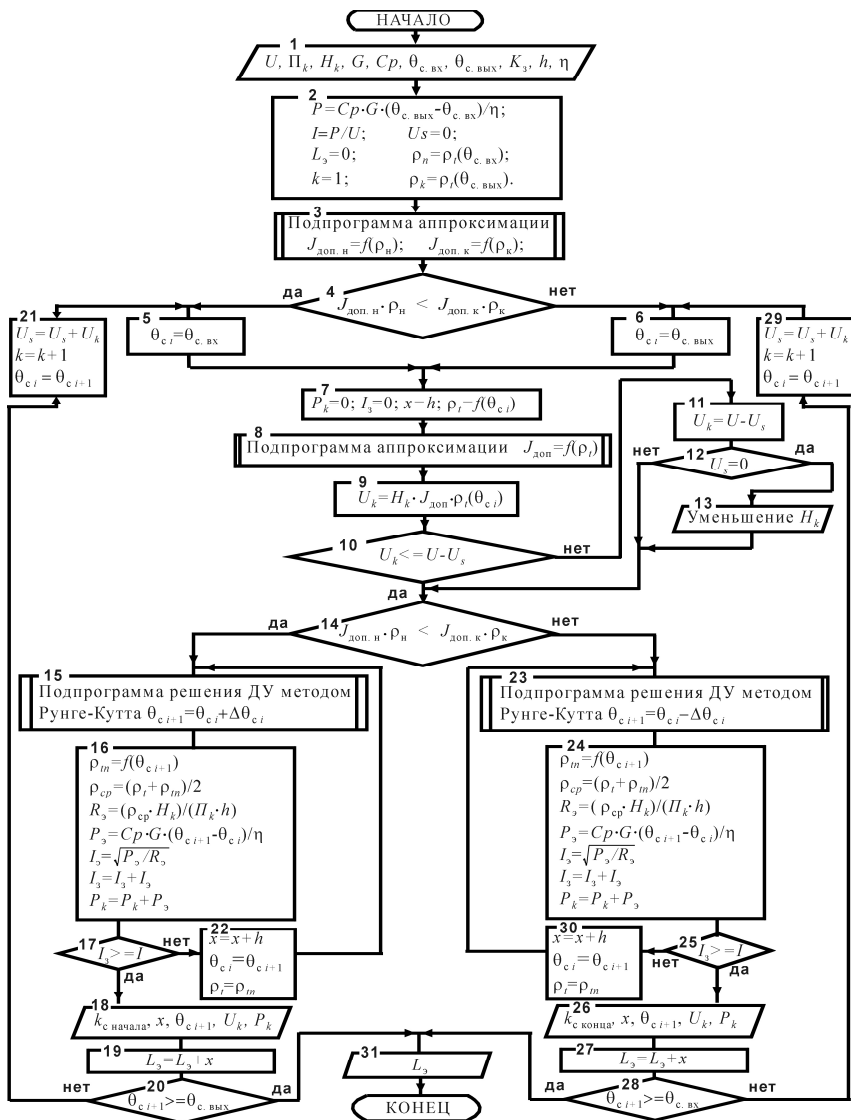


Рис. 4.4. Блок-схема алгоритма расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с зонированной электродной системой

В качестве примера получения равенства напряжения, рассчитанного по формуле (4.16), и разности $(U - U_s)$ рассмотрим вариант изменения межэлектродного расстояния H_k . Для этого необходимо найти решение нелинейного уравнения, записав его в общем виде следующим образом:

$$(U - U_s) - U_k = F(H_k) = 0. \quad (4.17)$$

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

$$H_{k\,n+1} = H_{k\,n} - \frac{F(H_{k\,n})}{F'(H_{k\,n})}, \quad (4.18)$$

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

$$F'(H_{k\,n}) = \frac{F(H_{k\,n} + E) - F(H_{k\,n})}{E}. \quad (4.19)$$

На рис. 4.5 представлен алгоритм определения межэлектродного расстояния H_k проточного ЭЭН с зонированной электродной системой, использующий метод Ньютона, на рис. 4.6 – алгоритм подпрограммы вычисления функции $F(H_k)$ несовпадения напряжения на последней расчетной зоне, полученного по допустимой плотности тока и равного разности напряжения питания и суммарного напряжения на рассчитанных зонах нагревателя.

В приведенном алгоритме подпрограммы вычисления функции $F(H_k)$ использованы те же обозначения, что и в алгоритме расчета конструктивных параметров проточного ЭЭН с зонированной электродной системой (см. рис. 4.4).

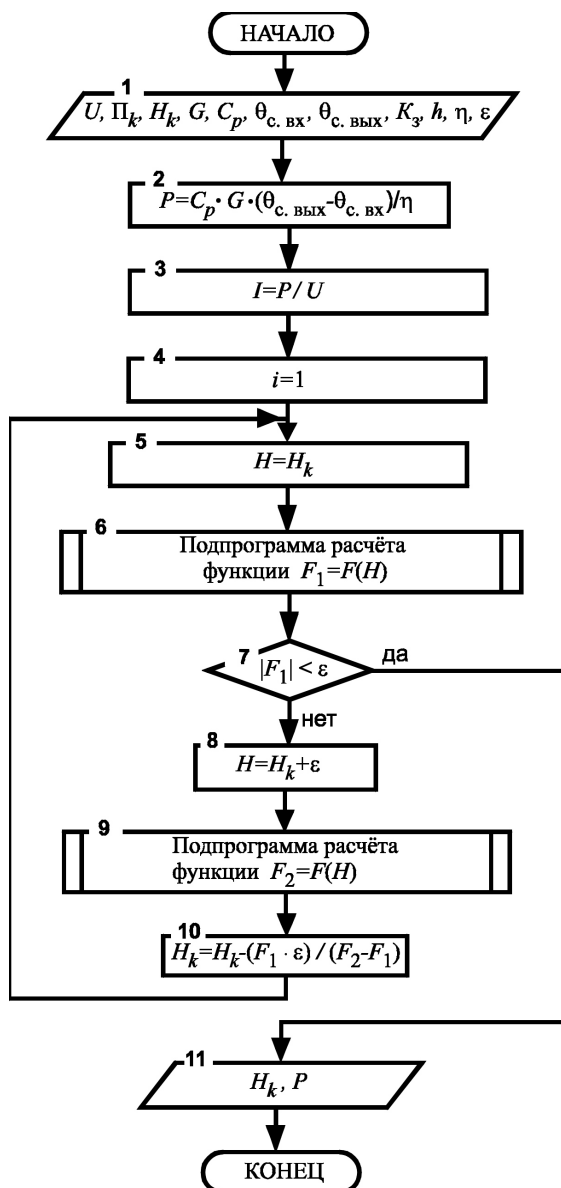


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритма определения межэлектродного расстояния проточного ЭЭН с зонированной электродной системой с использованием метода Ньютона

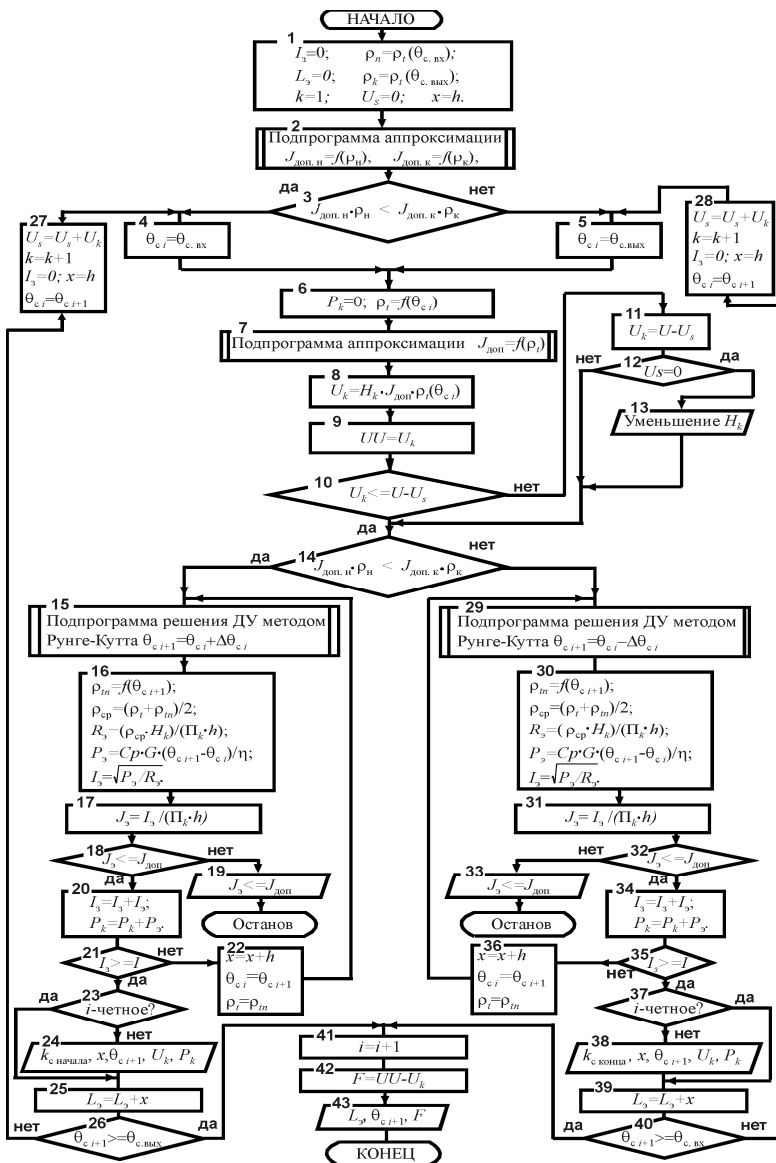


Рис. 4.6. Алгоритм подпрограммы вычисления несовпадения напряжения на последней расчетной зоне, полученного по допустимой плотности тока равного разности напряжения питания и суммарного напряжения на рассчитанных зонах нагревателя

При вычислении функции $F(H_k)$ в процессе расчета необходимо следить за тем, чтобы плотность тока по всей длине нагревателя не выходила за пределы допустимой, поэтому в алгоритме предусмотрен контроль допустимой плотности тока на каждом элементарном участке (секции) нагревателя. В случае, если плотность тока превышает допустимую, процесс расчета останавливается.

Обобщая особенности приведенных выше методик расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН с секционированными или зонированными электродными системами, можно отметить следующее:

- при их расчетах необходимо проведение большого количества вычислений, что требует использования ЭВМ;

- несмотря на множество возможных вариантов секционирования или зонирования электродных систем проточных ЭЭН предложенные методики можно использовать для расчета их конструктивных параметров, так как они разработаны для наиболее типичных вариантов их секционирования или зонирования;

- применение предложенного метода для расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН с секционированными электродными системами позволяет уменьшить их материалоемкость как минимум на 12 %...20 % в сравнении с материалоемкостью аналогичных плоскопараллельных ЭЭН;

- применение предложенного метода для расчета конструктивных параметров проточных ЭЭН с секционированными или зонированными электродными системами позволяет уменьшить тепловую инерционность на 15 %...30 % в сравнении с тепловой инерционностью аналогичных плоскопараллельных ЭЭН.

4.3 Техничко-экономическая оптимизация конструктивных параметров многозонных непроточных электродных электронагревателей-датчиков

Сложность оптимизации многозонных ЭЭН-Д заключается в наличии нелинейных зависимостей их характеристик от оптимизируемых конструктивных параметров. При разработке оптимальной конструкции ЭЭН-Д необходимо учитывать ограничения по материалоемкости, габаритным размерам, весу, стоимости,

неравномерности температурного поля, плотности тока и ряду других характеристик ЭЭН-Д, причем эти ограничения могут изменяться или дополняться в зависимости от назначения ЭЭН-Д. Поэтому оптимизацию ЭЭН-Д целесообразно проводить на ЭВМ с учетом тех или иных ограничений.

Непрерывный рост цен на топливно-энергетические ресурсы, и в частности на электроэнергию, обуславливает увеличение энергетической составляющей в себестоимости продукции. Поэтому одной из важнейших задач предприятий-производителей является всемерное повышение эффективного использования электроэнергии как весьма дорогого энергоносителя. Именно поэтому при разработке ЭНУ это требование является первоочередным. Значительный перерасход электроэнергии в ЭНУ происходит из-за высокой теплоемкости промежуточных теплоносителей, что приводит также к перерегулированию температуры ЭНУ. Чтобы обеспечить нагрев обрабатываемой среды до температуры, определяемой требованиями технологического процесса, современные ЭНУ оснащаются, как правило, дорогостоящими терморегуляторами, обеспечивающими реализацию необходимого закона регулирования. Однако регулирование величины и скорости изменения контролируемого параметра, а также его отклонения от заданного значения для некоторых термолабильных сред недостаточно. Например, высокая скорость образования отложений при термообработке пищевых продуктов [22, с. 9–15; 23, с. 11; 24], в том числе вязких молочных продуктов [25] и мясных изделий [26], существенно увеличивает вероятность нарушения технологического процесса нагрева. Поэтому для таких процессов возникает необходимость использования систем регулирования, которые ориентированы на конкретный технологический процесс с целью наиболее точного измерения контролируемых параметров. В настоящее время перспективным направлением является использование систем регулирования на базе микроконтроллеров [59, с. 120–127].

Использование ЭЭН-Д для нагрева обрабатываемой среды включает влияние теплоемкости промежуточного теплоносителя и датчика температуры, кроме того, позволяет получить ИС, характеризующий среднеинтегральную температуру в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д. Для этого параллельно ЭЭН-Д подключаются два последовательно соединенных сопротивления, так что образуется

измерительный мост, и с общей точки соединения этих сопротивлений и промежуточного электрода снимается ИС, который указывает на изменение температуры нагрева. Значительный по величине ИС разбаланса мостовой измерительной схемы и отсутствие промежуточных теплоносителей существенно упрощает и снижает стоимость терморегулятора.

Независимо от стоимости терморегулятора или системы регулирования температуры ЭНУ должна обеспечивать температуру обрабатываемой среды согласно требованиям технологического процесса. Следовательно, расход электроэнергии на нагрев обрабатываемой среды можно принять одинаковым.

Задачей технико-экономической оптимизации является разработка такой ЭНУ, которая обеспечит заданные технологические требования при минимальных приведенных затратах, на величину которых влияют стоимость нагревателя и терморегулятора, а также затраты на эксплуатацию, обслуживание и ремонт ЭНУ.

Математическая формулировка задачи оптимизация ЭЭН-Д сводится к поиску минимального значения принятой целевой функции Z_{Π} при выполнении принятых ограничений. Кроме того, в решаемой задаче основные эксплуатационные издержки должны быть приведены к начальному периоду по времени. Тогда для принятого критерия оптимизации целевая функция будет записана следующим образом [98, с. 129–137]:

$$Z_{\Pi} = (K_{\text{ЭНУ}} + I_{\text{ЭНУ}} \cdot \alpha_T) \rightarrow \min, \quad (4.20)$$

где $K_{\text{ЭНУ}}$ – капиталовложения, руб.;

$I_{\text{ЭНУ}}$ – ежегодные эксплуатационные издержки, руб./год;

α_T – коэффициент приведения к начальному периоду по времени.

Капиталовложения в ЭНУ определяются стоимостью нагревателя и системы регулирования температуры:

$$K_{\text{ЭНУ}} = K_{\text{МЭЭН-Д}} + K_{\text{ИЭЭН-Д}} + K_{\text{СРТ}}, \quad (4.21)$$

где $K_{м\text{ЭЭН-Д}}$ – стоимость материалов и комплектующих для ЭЭН-Д с учетом транспортных расходов, руб.;

$K_{и\text{ЭЭН-Д}}$ – стоимость изготовления ЭЭН-Д, руб.;

$K_{срт}$ – стоимость системы регулирования температуры, руб.

Ежегодные эксплуатационные издержки включают затраты на эксплуатацию, обслуживание и ремонт ЭНУ. Коэффициент приведения к начальному периоду по времени рассчитывается по формуле

$$\alpha_T = \frac{(1 + E)^T - 1}{E(1 + E)^T}, \quad (4.22)$$

где E – процентная ставка (норма дисконта), %;

T – конечный год получения дохода.

В технико-экономических расчетах расчетный срок службы энергетического оборудования определяется из выражения

$$T = 100 / P_A, \quad (4.23)$$

где P_A – норма амортизационных отчислений, %.

Стоимость материалов и комплектующих для ЭЭН-Д складывается из стоимости корпуса ЭЭН-Д K_K и стоимости электродов $K_Э$:

$$K_{м\text{ЭЭН-Д}} = K_K + K_Э. \quad (4.24)$$

Для конкретной конструкции ЭЭН-Д можно принять зависимость стоимости корпуса от габаритных размеров и стоимости его материала. Габаритные размеры, в свою очередь, зависят от размера электродных камер для всех зон нагрева и размера переходных камер между соседними зонами нагревателя. Размер электродных и переходных камер рассчитывается по размерам электродов, межэлектродному расстоянию и количеству зон нагрева.

$$K_K = f_1(\Pi_k, L_k, H_k, Kz, C_{M_K}), \quad (4.25)$$

где Π_k – ширина электрода на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, м;

L_k – длина электрода на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, м;

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

Kz – количество зон в ЭЭН-Д, шт.;

C_{M_K} – стоимость материала корпуса, руб.;

$k = 1 \dots Kz$.

Стоимость электродов будет определяться количеством электродов, их габаритными размерами и стоимостью материала электродов.

$$K_3 = f_2(\Pi_k, L_k, Kz, C_{M_3}), \quad (4.26)$$

где C_{M_3} – стоимость материала электродов, руб.

На стоимость системы регулирования температуры оказывает существенное влияние соотношение инерционности объекта регулирования и инерционности системы регулирования. Инерционность объекта регулирования зависит от скорости возникновения нестандартных или аварийных режимов работы. Инерционность системы регулирования, как правило, ограничивается инерционностью датчика температуры. При термообработке обраты и других молочных продуктов возможно лавинообразное образование отложений на электродах. Поэтому ЭНУ для этих целей должен содержать систему регулирования с низкоинерционным датчиком температуры.

Современные датчики температуры на базе термопар и термометров сопротивления обладают значительной тепловой инерционностью. Инерционность изменения показаний датчика температуры, по отношению к изменению температуры измеряемой среды, обусловлена конструкцией датчика. Современные датчики температуры комплектуются защитным кожухом, и теплопередача через его многослойную стенку существенно повышает инерционность измерения температуры [57, с. 44–47; 58, с. 5–14; 59, с. 120–127; 60]. Поэтому при изменении температуры обрабатываемой среды соответствующая информация от датчика будет поступать на систему регулирования с запаздыванием,

характеризуемым постоянной времени тепловой инерции. Для большинства современных промышленных датчиков температуры постоянная времени тепловой инерции доходит до 60 с. Их тепловая инерционность несколько снижается при повышении скорости измеряемой среды. Так, для ТСП-8045Р (ТСМ-8045Р), при повышении скорости движения обрабатываемой среды от 0,5 до 8,0 м/с постоянная времени тепловой инерции снижается с 60 до 5 с [99].

Для регулирования быстротечных процессов, и в особенности, если скорость движения измеряемой среды менее 0,5 м/с, при излишне высокой тепловой инерционности современных, промышленно выпускаемых датчиков температуры требуется существенное усложнение системы регулирования. При использовании инерционных датчиков температуры необходимо применение сложных регуляторов (П-, ПИ-, ПИД-регуляторов). В настоящее время для компенсации инерционности систем регулирования наиболее перспективным направлением считается применение систем регулирования температуры на базе микроконтроллеров [59, с. 120–127]. Однако использование контроллеров с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) существенно повышает стоимость систем регулирования. При использовании низкоинерционных ЭЭН-Д возможно не только снизить время тепловой инерции, но и существенно упростить схему регулирования. Поэтому при переходе к ЭЭН-Д на стоимость системы регулирования температуры будет существенно влиять величина ИС разбаланса мостовой измерительной схемы:

$$K_{\text{срт}} = \begin{cases} K_{\text{ТС}}, & \text{при } \Delta U \leq \Delta U_{\text{ТС}}; \\ K_{\text{СУ}}, & \text{при } \Delta U_{\text{ТС}} < \Delta U < U_{\text{ГР}}; \\ K_{\text{ГР}}, & \text{при } \Delta U \geq U_{\text{ГР}}, \end{cases} \quad (4.27)$$

где $K_{\text{ТС}}$ – стоимость системы регулирования, в которой используются инерционные датчики ТСМ или ТСП, руб.;

ΔU – ИС разбаланса мостовой измерительной схемы ЭЭН-Д, определяемый температурой обрабатываемой среды, В;

$\Delta U_{\text{ТС}}$ – ИС на входе терморегулятора или системы регулирования (разбаланса мостовой измерительной схемы) с терморезистором ТСМ или ТСП, В;

$K_{\text{СУ}}$ – стоимость системы регулирования, в которой ИС датчика выше $\Delta U_{\text{ТС}}$, но ниже $U_{\text{ГР}}$, руб.;

$U_{\Gamma P}$ – напряжение срабатывания герконового реле, В;

$K_{\Gamma P}$ – стоимость низкоинерционной системы регулирования, управляемой герковым реле, руб.

Система регулирования при $\Delta U_{TC} \leq \Delta U \leq U_{\Gamma P}$ будет дороже системы регулирования, управляемой герковым реле ($K_{\Gamma P}$), и дешевле системы регулирования с датчиком ТСМ или ТСП (K_{TC}). Если принять зависимость между величиной ИС датчика и стоимостью системы регулирования линейной обратнопропорциональной, то стоимость системы регулирования можно найти из выражения

$$K_{cy} = K_{\Gamma P} + (K_{TC} - K_{\Gamma P}) \frac{U_{\Gamma P} - \Delta U}{U_{\Gamma P} - \Delta U_{TC}}. \quad (4.28)$$

Проводя оптимизацию, также необходимо учитывать ограничения как по допустимой плотности тока в межэлектродном пространстве, так и по габаритным размерам ЭЭН-Д. Соответственно, вводя ограничения по допустимой плотности тока, наибольшей длине электронагревателя, минимальной ширине электродов и минимальному межэлектродному расстоянию, их можно записать в следующем виде:

$$J - J_{\text{доп}} \leq \nu; \quad (4.29)$$

$$\sum_{k=1}^{K_z} L_k - L_n \leq \chi; \quad (4.30)$$

$$H_k - H_{\min} \geq \delta; \quad (4.31)$$

$$\Pi_k - \Pi_{\min} \geq \phi, \quad (4.32)$$

где J – плотность тока в межэлектродном пространстве, A/m^2 ;

$J_{\text{доп}}$ – наибольшая допустимая плотность тока, A/m^2 ;

L_n – наибольшая допустимая длина электронагревателя, м;

$H_{\min}$ – наименьшее допустимое межэлектродное расстояние, м;

$\Pi_{\min}$ – наименьшая допустимая ширина электродов, м;

k – номер зоны ЭЭН-Д, $k = 1...Kz$;

v, χ, δ, ϕ – погрешности, характеризующие точность выполнения ограничений.

При изменении конструктивных параметров ЭЭН-Д (длины, ширины и межэлектродного расстояния) происходит и изменение мощности, выделяемой в межэлектродном пространстве. Однако изменение конструктивных параметров необходимо проводить так, чтобы мощность электродного нагревателя оставалась заданной:

$$P_{nag} = const. \quad (4.33)$$

Для этого на каждом шаге оптимизации, изменив длину электродов или межэлектродное расстояние, проводим изменение ширины электродов, корректируя тем самым мощность ЭЭН-Д.

Таким образом, ММ задачи технико-экономической оптимизации конструктивных параметров ЭЭН-Д можно записать в виде следующей системы уравнений [100, с. 20–24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\Pi} = (K_{ЭНУ} + И_{ЭНУ} \cdot \alpha_T) \rightarrow \min, \\ K_{ЭНУ} = K_{МЭЭН-Д} + K_{иЭЭН-Д} + K_{СРТ}; \\ \alpha_T = \frac{(1 + E)^T - 1}{E(1 + E)^T}; \\ K_{МЭЭН-Д} = K_K + K_{\mathcal{O}}; \\ K_K = f_1(\Pi_k, L_k, H_k, Kz, C_{M_K}); \\ K_{\mathcal{O}} = f_2(\Pi_k, L_k, Kz, C_{M_{\mathcal{O}}}); \\ K_{СРТ} = \begin{cases} K_{TC}, & \text{при } \Delta U \leq \Delta U_{TC}; \\ K_{CY}, & \text{при } \Delta U_{TC} \leq \Delta U \leq U_{ГР}; \\ K_{ГР}, & \text{при } \Delta U \geq U_{ГР}; \end{cases} \\ K_{CY} = K_{ГР} + (K_{TC} - K_{ГР}) \frac{U_{ГР} - \Delta U}{U_{ГР} - \Delta U_{TC}}, \\ J - J_{доп} \leq v; \\ \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n \leq \chi; \\ H_k - H_{\min} \geq \delta; \\ \Pi_k - \Pi_{\min} \geq \phi; \\ P_{nag} = const. \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Для сведения исходной задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации воспользуемся методом внешних штрафных функций. Тогда для рассматриваемой оптимизации внешнюю штрафную функцию можно записать в виде

$$\Phi(x, \alpha) = \xi [\zeta(x) + \lambda(x) + \vartheta(x) + \psi(x)], \quad (4.35)$$

где ξ – коэффициент штрафа;

$\zeta(x)$, $\lambda(x)$, $\vartheta(x)$, $\psi(x)$ – функции, определяемые, соответственно, ограничениями выражений (4.29)...(4.32) исходной задачи.

$$\zeta(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } J - J_{\text{доп}} - v \leq 0; \\ J - J_{\text{доп}} - v, & \text{при } J - J_{\text{доп}} - v > 0; \end{cases} \quad (4.36)$$

$$\lambda(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi \leq 0; \\ \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi, & \text{при } \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi > 0; \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\vartheta(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } H_k - H_{\min} - \delta \geq 0; \\ H_k - H_{\min} - \delta, & \text{при } H_k - H_{\min} - \delta < 0; \end{cases} \quad (4.38)$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } \Pi_k - \Pi_{\min} - \varphi \geq 0; \\ \Pi_k - \Pi_{\min} - \varphi, & \text{при } \Pi_k - \Pi_{\min} - \varphi < 0. \end{cases} \quad (4.39)$$

Тогда целевая функция, с использованием штрафной функции, примет вид

$$F(x, \alpha) = Z_{\Pi} + \xi [\zeta(x) + \lambda(x) + \vartheta(x) + \psi(x)]. \quad (4.40)$$

В литературе [101, с. 163–209] приводятся различные способы оптимизации подобных задач. Для этой задачи наиболее эффективным

оказался градиентный метод наискорейшего спуска [4, с. 20–24]. Его блок-схема алгоритма изображена на рис. 4.7.

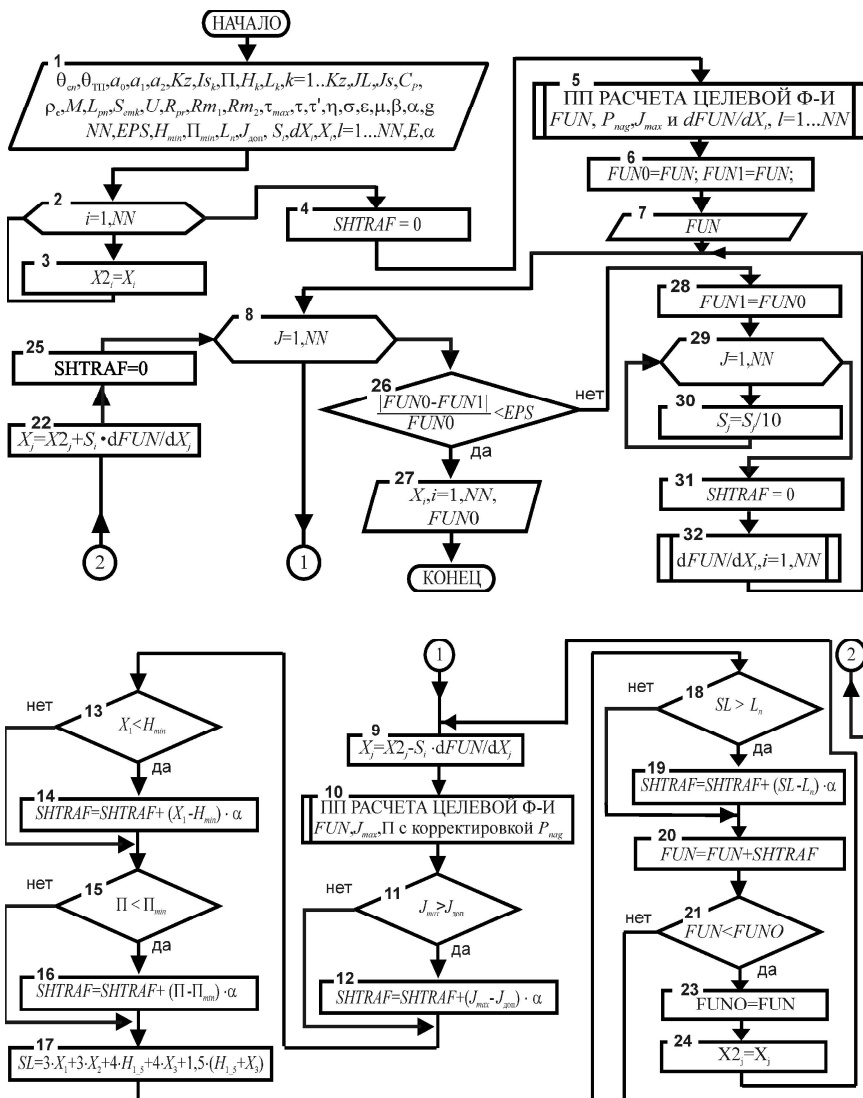


Рис. 4.7. Блок-схема алгоритма технико-экономической оптимизации параметров многозонных непроточных ЭЭН-Д методом наискорейшего спуска

В приведенной блок-схеме алгоритма приняты следующие обозначения:

FUN – целевая функция оптимизации приведенных затрат, руб.;

$H_{\min}$ – граничное значение межэлектродного расстояния, м;

$\Pi_{\min}$ – граничное значение ширины электродов, м;

L_3 – граничное значение длины электродов, м;

$J_{\text{доп}}$ – граничное значение плотности тока, А/м²;

$SHTRAF$ – штрафная функция выхода оптимизации за ограничения, руб.;

α – коэффициент штрафа, о. е.;

S_i – шаг по оптимизируемым параметрам, м.

При проведении оптимизации проводится расчет длины корпуса ЭЭН-Д:

$$SL = \sum_{k=1}^{Kz} L_k. \quad (4.41)$$

При проведении оптимизации длина электродов на 1-, 3-, 5-й зонах нагрева (см. рис. 2.5) принята одинаковой:

$$L_1 = L_3 = L_5 = X_1, \quad (4.42)$$

где X_1 – первый оптимизируемый параметр, длина электродов, соответственно, на 1-, 3-, 5-й зонах нагрева;

$$L_7 = L_9 = L_{11} = X_2, \quad (4.43)$$

где X_2 – второй оптимизируемый параметр, длина электродов, соответственно, на 7-, 9-, 11-й зонах нагрева (см. рис. 2.5).

При проведении оптимизации межэлектродные расстояния H_1 , H_3 , H_5 приняты равными и выбраны минимальными, исходя из мощности ЭЭН-Д при нагреве среды:

$$H_1 + H_3 + H_5 = H_{1-5}, \quad (4.44)$$

где H_{1-5} – межэлектродное расстояние на 1-, 3-, 5-й зонах нагрева.

Длина электродов на 2-, 4-, 8- и 10-й межэлектродных зонах нагревателя L_2, L_4, L_8, L_{10} принимается по два межэлектродных расстояния.

$$L_2 = L_4 = 2H_{1_5}; \quad (4.45)$$

$$L_8 = L_{10} = 2X_3, \quad (4.46)$$

где X_3 – третий оптимизируемый параметр, межэлектродное расстояние на 7-, 9-, 11-й зонах нагрева.

Длина электродов на 6-й межэлектродной зоне нагревателя L_6 принимается как три усредненных межэлектродных расстояния на зонах 1-, 3-, 5- и 7-, 9-, 11-й и рассчитывается по формуле

$$L_6 = \frac{3H_{1_5} + H_7 + H_9 + H_{11}}{2}. \quad (4.47)$$

Поскольку при проведении оптимизации принимаем, что $H_7 = H_9 = H_{11} = X_3$, то выражение (4.47) можно записать, как

$$L_6 = 1,5(H_{1_5} + X_3). \quad (4.48)$$

Тогда уравнение (4.41) расчета длины корпуса ЭЭН-Д с учетом выражений (4.42)...(4.48) примет вид:

$$SL = 3X_1 + 3X_2 + 4H_{1_5} + 4X_3 + 1,5(H_{1_5} + X_3). \quad (4.49)$$

Формула (4.49) используется в блоке 17 блок-схемы алгоритма, изображенной на рис. 4.7, для расчета длины корпуса ЭЭН-Д.

В подпрограмме расчета функции для корректировки требуемой мощности ЭЭН-Д (P_{nag}) используется метод Ньютона. Для расчета функции корректировки требуемой мощности ЭЭН-Д рассчитывается разность между фактической мощностью нагревателя P_1 и требуемой P_{nag} . При этом разность между фактической мощностью нагревателя P_1 и требуемой P_{nag} должна стремиться к нулю.

$$P_1 - P_{nag} = F(\Pi) \rightarrow 0. \quad (4.50)$$

При проведении корректировки мощности ЭЭН-Д новое $(n+1)$ -е приближение ширины электродов определяется по формуле

$$\Pi_{n+1} = \Pi_n - \frac{F(\Pi_n)}{F'(\Pi_n)}, \quad (4.51)$$

где производную $F'(\Pi_n)$, в свою очередь, определяем численно, используя достаточно малое приращение ширины электродов E :

$$F'(\Pi_n) = \frac{F(\Pi_n + E) - F(\Pi_n)}{E}. \quad (4.52)$$

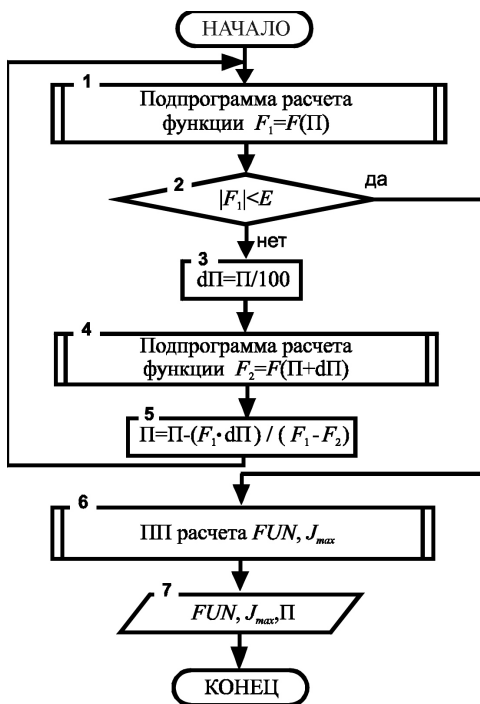
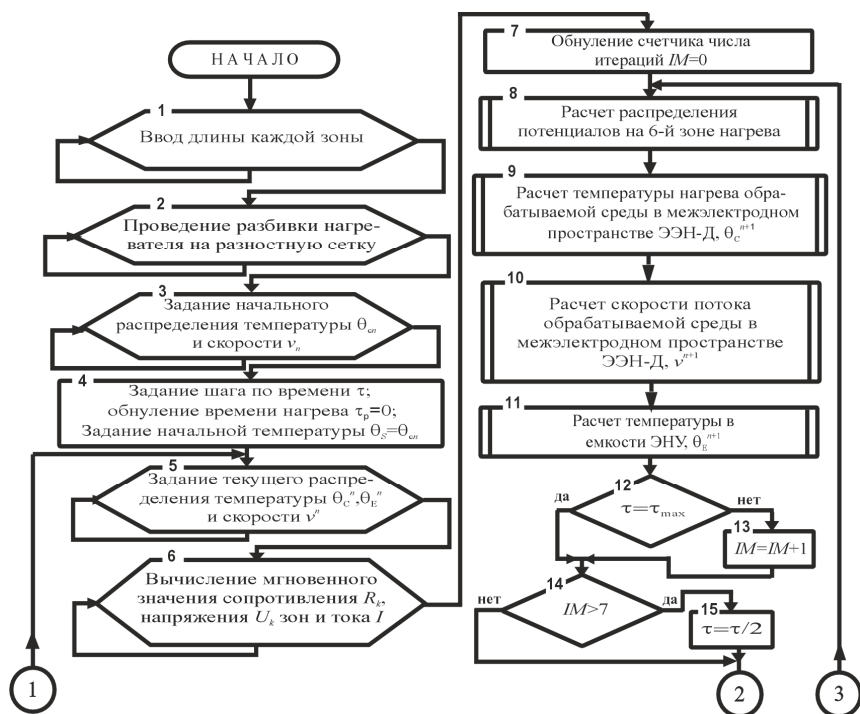
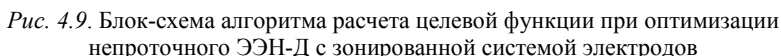


Рис. 4.8. Блок-схема алгоритма расчета функции для корректировки мощности ЭЭН-Д методом Ньютона

Блок-схема алгоритма расчета функции для корректировки мощности ЭЭН-Д методом Ньютона приведена на рис. 4.8, блок-схема алгоритма расчета целевой функции при оптимизации непероточного ЭЭН-Д с зонированной системой электродов – на рис. 4.9. Результаты технико-экономической оптимизации параметров многозонных непероточных электродных электронагревателей-датчиков показывают, что предложенная методика оптимизации позволяет обеспечить снижение приведенных затрат ЭНУ с ЭЭН-Д для подогрева 150 кг обрат за 30 минут с 10 °С до 38 °С на 5,6 %, в сравнении с ЭНУ, оснащенной датчиком температуры PT-100(TSP-100), подключенным к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP (приложение Б). Предложенную методику технико-экономической оптимизации при некоторой адаптации возможно использовать для ЭНУ с другими электротепловыми схемами ЭЭН-Д.





Уровень развития техники характеризуется повышением степени автоматизации установок на базе электронных регуляторов, полупроводниковой преобразовательной техники и программного управления. Применение автоматизации повышает качество нагрева обрабатываемой среды в ЭНУ, при этом снижается расход электроэнергии.

155

включает в себя измерительное устройство, содержащее чувствительный элемент, реагирующий на отклонение регулируемой величины. Чувствительным элементом современных, серийно выпускаемых терморегуляторов являются контактные термометры, термопары и терморезисторы. В зависимости от схемы терморегулятор может быть выполнен на контактных и бесконтактных полупроводниковых электрических элементах.

Терморегуляторы должны соответствовать основным требованиям, предъявляемым к системам автоматического регулирования. Требования определяются статическими и динамическими свойствами систем регулирования, надежностью работы систем регулирования, их устойчивостью к влиянию внешних воздействий и способностью сохранять свои характеристики в течение определенного промежутка времени. Многие из них могут использоваться для регулирования температуры обрабатываемой среды и в ЭНУ с ЭЭН. Основной их недостаток в том, что чувствительный элемент (датчик) имеет инерционность, сравнимую с инерционностью ЭЭН. Это сужает область их применения в ЭНУ с ЭЭН ввиду значительного перерегулирования заданной температуры и значительной статической ошибки. Наилучшим путем устранения указанных недостатков является замена используемых чувствительных элементов принципиально новыми устройствами. Для контроля температуры обрабатываемой среды целесообразно использовать информацию об изменении сопротивления обрабатываемой среды в зависимости от ее температуры. В качестве примера решения указанной задачи можно привести разработанный ЭЭН-Д токопроводящих сред.

При электродном электронагреве мощность ЭНУ зависит от температуры на входе в ЭЭН-Д, удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента электрического сопротивления, поэтому для оптимального проведения процесса нагрева необходимо контролировать температуру на выходе из ЭЭН-Д и, соответственно, корректировать массовый расход обрабатываемой среды или напряжение питания. Однако при разработке ЭНУ, для которых непрерывность цикла нагрева не является обязательным условием, целесообразно использовать непроточную электро-тепловую схему электродных электронагревательных установок. Это позволяет значительно упростить процесс регулирования. При изменении начальных значений температуры обрабатываемой среды,

удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента электрического сопротивления, для достижения требуемой температуры обрабатываемой среды, в конце обработки необходимо изменить только время термообработки, что упрощает схему регулирования и повышает надежность ЭНУ.

Для продуктивного ведения животноводства необходимо соблюдать зоотехнические требования к кормлению животных. Обрат, входящий в рацион кормления телят, необходимо подогревать до 38 °С. Для этих целей на небольших фермах целесообразно использовать ЭНУ с зонированным электродным электронагревателем, что позволит нагревать до требуемой температуры обрат и воду. Необходимость нагрева воды для мойки молочного оборудования, возникает после окончания отопительного периода и отключения котельных.

Схема управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д представлена на рис. 4.10 [102]. Кроме того, в приложении В приведен усовершенствованный вариант схемы управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д, который позволяет проводить нагрев обрата и воды на различных режимах с повышенной мощностью.

Включение ЭНУ (см. рис. 4.10) происходит при замыкании контакта промежуточного реле KV1. При этом срабатывает магнитный пускатель KM1, и питающее напряжение подается на ЭЭН-Д. При отсутствии напряжения на катушке магнитного пускателя KM2 питающее напряжение, через контакты KM2.1, подается на электроды 1, 3, 5 и 7, 9, 11. ЭЭН-Д работает в режиме нагрева обрата. Для индикации этого режима используется светодиод HL2. К фазному электроду 3-й зоны нагрева и нулевому электроду 9-й подключены последовательносоединенные переменное и постоянное сопротивления R1 и R2. Эти сопротивления, совместно с термозависимым сопротивлением обрабатываемой среды, между электродами 3-й и 9-й зон нагрева образуют измерительный мост. Измерительный мост балансируется при холодном состоянии обрабатываемой среды между электродами ЭЭН-Д. Во время нагрева изменяется сопротивление плеч мостовой измерительной схемы. ИС разбаланса моста подается на управляющий орган САР, который при достижении требуемых значений температуры обрабатываемой среды замыкает контакт промежуточного реле KV1.

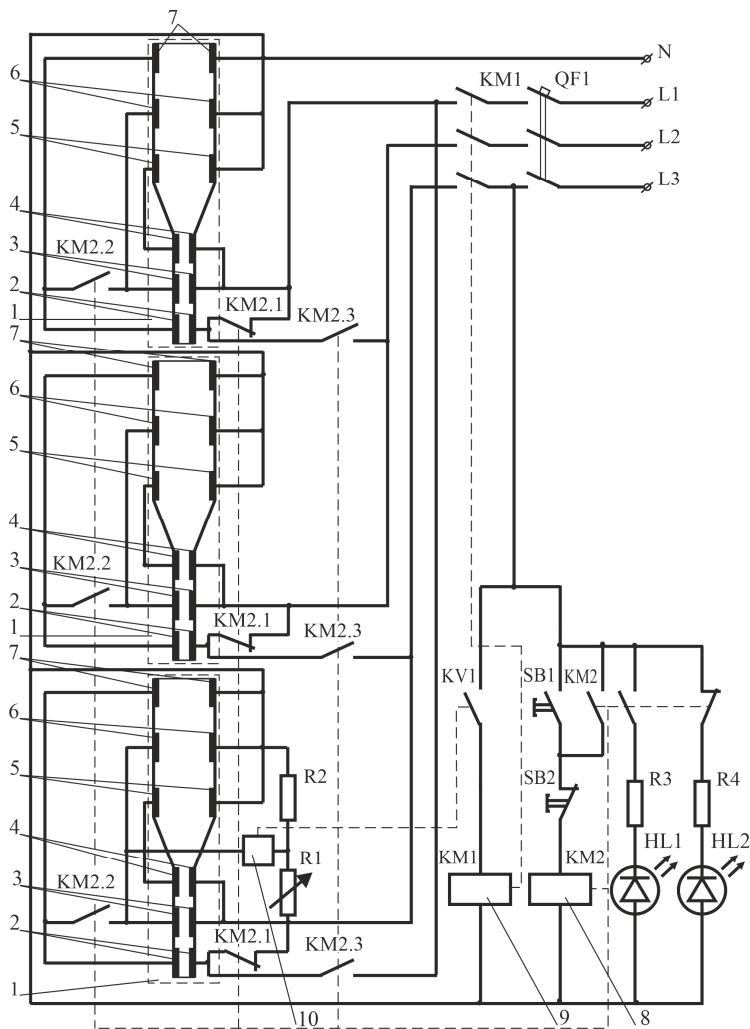


Рис. 4.10. Схема управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д для нагрева
обрата и воды:

- 1 – ЭЭН-Д; 2 – электроды 1-й зоны нагрева; 3 – электроды 3-й зоны нагрева;
4 – электроды 5-й зоны нагрева; 5 – электроды 7-й зоны нагрева;
6 – электроды 9-й зоны нагрева; 7 – электроды 11-й зоны нагрева;
8 – обмотка магнитного пускателя, обеспечивающего переключение режима
нагрева вода-обрат;
9 – обмотка магнитного пускателя обеспечивающего включение-отключение ЭНУ;
10 – управляющий орган САР

Для переключения ЭНУ в режим нагрева воды используются кнопки SV1 и SV2. После срабатывания магнитного пускателя КМ2 размыкаются контакты КМ2.1 и замыкаются контакты КМ2.2 и КМ2.3. При этом линейное напряжение 380 В подается на электроды последовательно соединенных 1-й и 3-й зон нагрева. Светодиод HL1 служит для индикации этого режима. Переменное и постоянное сопротивления R1 и R2, вместе с термозависимыми сопротивлениями обрабатываемой среды, между электродами 1-й и 3-й зоны нагрева образуют измерительный мост. ИС разбаланса этого моста подается на управляющий орган САР, и при достижении требуемой температуры нагрева проводится отключение нагревателя.

В заключение, обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить, что предложенные методики позволяют проводить расчеты конструктивных параметров ЭЭН-Д с точностью, достаточной для их практической реализации.

4.5 Сравнительный анализ эффективности проточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами

Одним из основных требований при разработке ЭНУ с ЭЭН является обеспечение допустимой (заданной) плотности тока в межэлектродном пространстве ЭЭН [103; 104, с. 338–343; 105, с. 27–31; 106, с. 116–117; 107, с. 151–153; 108, с. 158–159]. В связи с нелинейной температурной зависимостью удельного сопротивления обрабатываемой среды (см. уравнение (2.1)) плотность тока в межэлектродном пространстве возрастает при электротепловой обработке (см. таблицу 2.2). Снижение материалоемкости и тепловой инерционности ЭНУ с ЭЭН ограничивается величиной допустимой плотности тока. Для сравнительного анализа эффективности ЭНУ на базе секционированных и зонированных ЭЭН сравнивались характеристики секционированного ЭЭН, двух-, трех- и четырехзонного ЭЭН и проточного однозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой.

Проточный однозонный ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой характеризуется следующими параметрами: $L = 0,0163$ м; $\Pi = 0,04$ м; $H = 0,0163$ м; $G = 0,002$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С);

$\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$; $\eta = 0,95$; $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$.

ЭЭН с секционированной электродной системой характеризуется следующими параметрами: $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $\eta = 0,95$; $X_1 = 0,001 \text{ м}$; $H_1 = 0,0104 \text{ м}$; $X_2 = 0,011 \text{ м}$; $H_2 = 0,0107 \text{ м}$; $X_3 = 0,021 \text{ м}$; $H_3 = 0,0110 \text{ м}$; $X_4 = 0,031 \text{ м}$; $H_4 = 0,0115 \text{ м}$; $X_5 = 0,041 \text{ м}$; $H_5 = 0,0120 \text{ м}$; $X_6 = 0,051 \text{ м}$; $H_6 = 0,0127 \text{ м}$; $X_7 = 0,061 \text{ м}$; $H_7 = 0,0136 \text{ м}$; $X_8 = 0,071 \text{ м}$; $H_8 = 0,0147 \text{ м}$; $X_9 = 0,081 \text{ м}$; $H_9 = 0,0160 \text{ м}$; $L = 0,084 \text{ м}$; $H_{10} = 0,0163 \text{ м}$; $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$; $G = 0,002 \text{ кг/с}$; $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$.

Двухзонный ЭЭН характеризуется следующими параметрами: $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $H = 0,0072 \text{ м}$; $L_1 = 0,101 \text{ м}$; $L_2 = 0,089 \text{ м}$; $\eta = 0,95$; $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$; $G = 0,002 \text{ кг/с}$; $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$.

Трехзонный ЭЭН характеризуется следующими параметрами: $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $H = 0,0046 \text{ м}$; $L_1 = 0,099 \text{ м}$; $L_2 = 0,089 \text{ м}$; $L_3 = 0,083 \text{ м}$; $\eta = 0,95$; $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$; $G = 0,002 \text{ кг/с}$; $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$.

Четырехзонный ЭЭН характеризуется следующими параметрами: $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $H = 0,0034 \text{ м}$; $L_1 = 0,1 \text{ м}$; $L_2 = 0,09 \text{ м}$; $L_3 = 0,085 \text{ м}$; $L_4 = 0,08 \text{ м}$; $\eta = 0,95$; $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$; $U = 220 \text{ В}$; $G = 0,002 \text{ кг/с}$; $\rho_o = 37,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_o(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$.

Исследование проводилось при следующих значениях температуры ЭЭН: на входе $\theta_{c, \text{вх}} = 5^\circ\text{C}$, на выходе $\theta_{c, \text{вых}} = 60^\circ\text{C}$.

Изменение материалоемкости (площади электродов) δ_{S_i} , соответственно, для секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного проточного ЭЭН по отношению к проточному однозонному ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой рассчитывается по выражению

$$\delta_{S_i} = \frac{S_{1Z} - S_i}{S_{1Z}} 100 \%, \quad (4.53)$$

где S_{1Z} – площадь электродов проточного однозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, м^2 .

S_i – площадь электродов соответствующих, указанных выше, проточных ЭЭН, м²;

i – индекс, соответствующий секционированному (сз), двухзонному (2з), трехзонному (3з) и четырехзонному (4з) проточному ЭЭН.

Результаты расчета изменения материалоемкости (площади электродов) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Изменение материалоемкости (площади электродов) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой

Вид проточного ЭЭН	Площадь электродов S_i , м ²	Изменение площади электродов δS_i , %
однозонный	0,00888	–
секционированный	0,00672	–24,32
двухзонный	0,01520	71,17
трехзонный	0,02168	144,14
четырезонный	0,02840	219,82

Тепловая инерционность объекта характеризуется постоянной времени T . Это время, в течение которого значение температуры объекта достигнет 0,638 установившейся температуры. Снижение тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) указанных выше проточных ЭЭН δ_{Ti} по отношению к проточному однозонному ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, рассчитывается по уравнению

$$\delta_{Ti} = \frac{T_{1z} - T_i}{T_{1z}} 100 \%, \quad (4.54)$$

где T_{1z} – постоянная времени нагрева однозонного (1з) проточного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой, с;

T_i – постоянная времени нагрева проточного секционированного (сз), двухзонного (2з), трехзонного (3з) и четырехзонного (4з) ЭЭН, с.

Результаты расчета снижения тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Снижение тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) проточного секционированного, двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН по сравнению с проточным однозонным ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой

Вид проточного ЭЭН	Постоянная времени T_i , с	Снижение тепловой инерционности δ_{T_i} , %
однозонный	24,49	—
секционированный	15,87	35,20
двухзонный	19,61	19,93
трехзонный	17,86	27,07
четыrehзонный	16,85	31,20

Повышение величины ИС, характеризующего температуру нагрева в проточных ЭЭН-Д с зонированными электродными системами $\delta_{\Delta U_{ij}}$, по сравнению с ИС, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСП), на примере датчика температуры РТ-100(ТСП-100), подключенного к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP, рассчитывается по уравнению

$$\delta_{\Delta U_{ij}} = \frac{\Delta U_{ij} - \Delta U_{TS}}{\Delta U_{TS}} 100 \%, \quad (4.55)$$

где ΔU_{ij} – величина ИС двухзонного (2з), трехзонного (3з) и четырехзонного (4з) проточного ЭЭН-Д, на промежуточном электроде j , где j – номер промежуточного электрода от начала ЭЭН-Д, для 2з принимает значение $j = 1$, для 3з принимает, соответственно,

значения 1 и 2 и для $4z - 1, 2$ и 3 ; i – принимает, соответственно, значения $2z, 3z$ и $4z$;

ΔU_{TS} – величина ИС в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСП), В.

Результаты расчета повышения величины ИС, характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды в проточных ЭЭН-Д с зонированными электродными системами, по сравнению с ИС, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСП) для проточного двухзонного, трехзонного и четырехзонного ЭЭН по сравнению с ИС, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСП), на примере датчика температуры PT-100 (TSP-100), подключенного к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Повышение величины ИС, характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды, в двухзонных, трехзонных и четырехзонных проточных ЭЭН по сравнению с ИС TSP-100

Название источника ИС, характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды	Номер промежуточного электрода j	Величина ИС ΔU , В	Повышение величины ИС в сравнении с ИС TSP-100 $\delta_{\Delta U_{TP}} \%$
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

Полученные результаты показывают, что проведение термообработки, при допустимых значениях плотности тока в межэлектродном пространстве ЭЭН, с использованием секционированных ЭЭН приводит к снижению материалоемкости (в сравнении с однозонным проточным ЭЭН) на 24,32 % и тепловой инерционности на 35,20 %. Использование для проведения термообработки двухзонных проточных ЭЭН, ЭЭН-Д приводит к снижению тепловой инерционности (в сравнении с однозонным проточным ЭЭН) на 19,93 % и увеличению материалоемкости на 71,17 %. При использовании для проведения термообработки трехзонных проточных ЭЭН, ЭЭН-Д происходит снижение тепловой инерционности (по сравнению с однозонным проточным ЭЭН) на 27,07 % и увеличение материалоемкости на 144,14 %. Использование для проведения термообработки четырехзонных проточных ЭЭН приводит к снижению тепловой инерционности (по сравнению с однозонным проточным ЭЭН) на 31,20 % и увеличению материалоемкости на 219,82 %. Зонирование ЭЭН позволяет получить мощный ИС, более чем в 1000 раз превосходящий ИС от серийно выпускаемых датчиков температуры. Величина ИС зависит от расположения промежуточного электрода и имеет наибольшее значение на том электроде, который расположен ближе к середине ЭЭН-Д. Величина ИС также увеличивается с увеличением количества зон ЭЭН-Д [11, с. 15–20].

Сравнительный анализ ЭЭН с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами показал, что:

1. Несмотря на множество возможных вариантов секционирования и зонирования ЭЭН разработанные методики расчета можно легко адаптировать для расчета конструктивных параметров и других ЭЭН, так как они разработаны для наиболее типичных вариантов их секционирования или зонирования [10, с. 52–55; 65; 95, с. 16–22].

2. 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 [95, с. 16–22; 61, с. 35–46; 97].

3. При использовании секционирования ЭЭН, для проведения термообработки с соблюдением допустимых значений плотности тока в межэлектродном пространстве ЭЭН, происходит снижение их материалоемкости на 24,32 % и тепловой инерционности на 35,20 % по сравнению с однозонным проточным ЭЭН. Использование зонирования ЭЭН и 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 тепловой инерционности на 19,93 %...31,20 % относительно проточного ЭЭН с однозонной плоскопараллельной электродной системой. Кроме того, зонированные ЭЭН-Д позволяют получить мощный ИС, более чем в 1000 раз превосходящий ИС от серийно выпускаемых датчиков температуры [11, с. 15–20; 104, с. 338–343].

4. Расчеты по разработанному алгоритму технико-экономической оптимизации конструкции ЭЭН-Д показывают, что приведенные затраты в ЭНУ с ЭЭН-Д при подогреве обраты с 10 °С до 38 °С снизились на 5,6 % по сравнению с ЭНУ, оснащенной датчиком температуры РТ-100(TSP-100), подключенным к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP [14, с. 28].

5. Разработанная ЭНУ с ЭЭН-Д для подогрева обраты, выполняющая одновременно термообработку, контроль температуры и регулирование процесса термообработки, показала высокую точность поддержания температуры среды при относительной простоте схемы управления [14, с. 23–28; 102].

ГЛАВА 5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ МНОГОЗОННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ

Применение ЭЭН-Д не исчерпывается рассмотренными областями использования в качестве нагревателя и датчика температуры. Результаты теоретических и экспериментальных исследований указывают на возможность выполнения ими таких функций, как защита ЭНУ при отклонении режимов работы от нормальных, контроля количества отложений и интенсивности парообразования. Указанные функции ЭЭН-Д обладают оригинальностью и требуют необходимости их теоретического обоснования.

5.1 Математическое моделирование электротепловых характеристик многозонных электродных электронагревателей-датчиков при отклонении режимов работы от нормальных

Отклонение режимов работы ЭНУ с ЭЭН от нормальных, как правило, приводит к изменению допустимой плотности тока на электродах. Превышение допустимой плотности тока на электродах может привести к нарушению технологического процесса, перегреву обрабатываемой среды и лавинообразному росту отложений на электродах. Нарушение нормальных условий работы может возникнуть в результате понижения величины массового расхода обрабатываемой среды у проточного ЭЭН ниже допустимой величины.

Электротепловые процессы, происходящие в проточном ЭЭН-Д (см. рис. 2.3) без учета теплопотерь в окружающую среду, описываются следующей системой уравнений [109, с. 23–31; 110, с. 25–32; 111, с. 180–182]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p \cdot \rho_c \cdot H \cdot \Pi \frac{d\theta_c}{d\tau} + C_p \cdot G \frac{d\theta_c}{dx} = \frac{U_k^2 \cdot \Pi}{\rho_t(\theta_c) \cdot H}; \\ U = \sum_{k=1}^N U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \\ I = C_p \cdot G (\theta_{c, \text{вых}} - \theta_{c(0)}) / (\eta \cdot U); \\ R_k = \int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H dx / \left(\int_0^{L_k} \Pi dx \cdot L_k^2 \right). \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Расчеты проводились для различных величин массового расхода G обрабатываемой среды (воды) в пределах от величины расхода, для которой проектировался ЭЭН-Д $G_{\text{пр}}$, и до минимальной величины расхода, равной нулю, т. е. $G_{\text{пр}} \geq G \geq 0$. При этом определялись: время нагрева τ , величина ИС ΔU в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д и распределение температуры по длине электродного электронагревателя во времени τ . На рис. 5.1 приведены сравнительные результаты изменения температуры обрабатываемой среды (воды) на выходе ЭЭН-Д, во время τ ее нагрева, относительно проектируемого режима работы ЭЭН-Д.

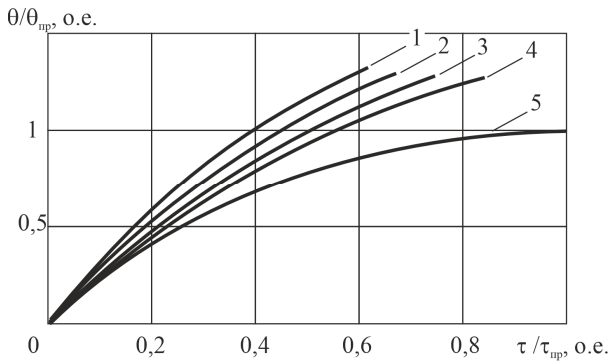


Рис. 5.1. Графики относительного изменения температуры $\theta/\theta_{\text{пр}}$ обрабатываемой среды (воды) на выходе пятизонного ЭЭН-Д во время $\tau/\tau_{\text{пр}}$ ее нагрева относительно проектируемого режима работы ЭЭН-Д при: $C_p = 4174 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho_c = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $G = 0,002 \text{ кг}/\text{с}$; $H = 0,006 \text{ м}$; $\Pi = 0,04 \text{ м}$; $L_1 = 0,161 \text{ м}$; $L_2 = 0,126 \text{ м}$; $L_3 = 0,119 \text{ м}$; $L_4 = 0,114 \text{ м}$; $L_5 = 0,110 \text{ м}$; $\rho_0 = 37,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\alpha_T = -0,009 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_0(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$; 1 – $G = 0 \text{ кг}/\text{с}$; 2 – $G = 0,0005 \text{ кг}/\text{с}$; 3 – $G = 0,001 \text{ кг}/\text{с}$; 4 – $G = 0,0015 \text{ кг}/\text{с}$; 5 – $G = 0,002 \text{ кг}/\text{с}$

За базовое время $\tau_{\text{пр}}$ принято время, в течение которого в ЭЭН-Д температура обрабатываемой среды достигает на выходе нагревателя величины, заданной требованиями технологического процесса. За базовую температуру $\theta_{\text{пр}}$ принята температура обрабатываемой среды на выходе ЭЭН-Д, обусловленная требованиями технологического процесса.

Анализ зависимостей $\theta / \theta_{\text{пр}}$ от $\tau / \tau_{\text{пр}}$ (рис. 5.1) показывает, что при уменьшении массового расхода обрабатываемой среды увеличивается температура среды и уменьшается время ее нагрева (рис. 5.2). При этом ИС разбаланса моста ΔU , равный разбалансу моста при проектируемом режиме работы, достигается также за меньшее время (рис. 5.3).

На рис. 5.2 представлен график изменения времени τ достижения температуры обрабатываемой среды $\theta_{\text{пр}}$ на выходе пятизонного ЭЭН-Д от величины массового расхода G обрабатываемой среды. График зависимости показывает, что при уменьшении величины массового расхода G обрабатываемой среды уменьшается и время τ достижения температуры $\theta_{\text{пр}}$, при этом зависимость имеет явно выраженный нелинейный характер.

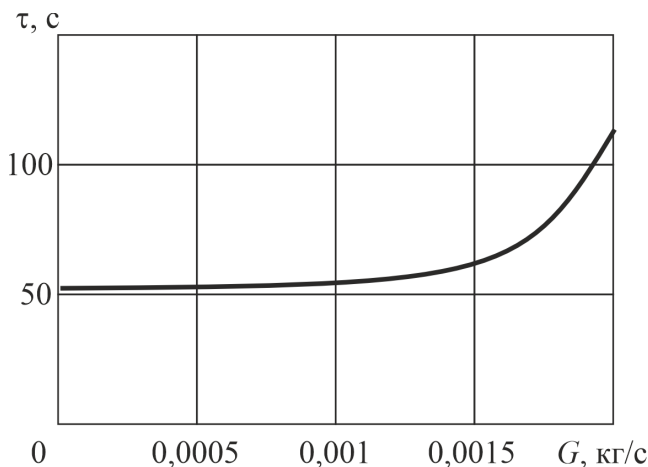


Рис. 5.2. График изменения времени τ достижения температуры обрабатываемой среды $\theta_{\text{пр}}$ на выходе пятизонного ЭЭН-Д от величины массового расхода G обрабатываемой среды при: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м;
 $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,119$ м; $L_4 = 0,114$ м; $L_5 = 0,11$ м;
 $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_0(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$

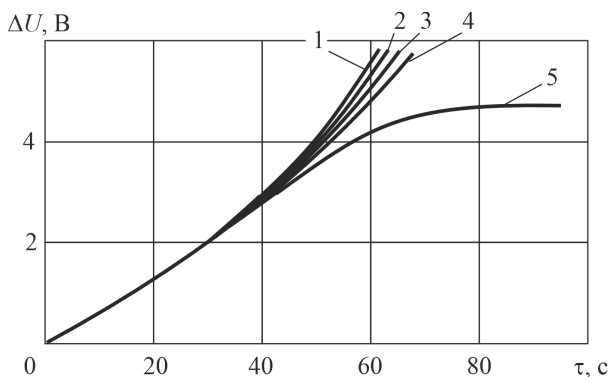


Рис. 5.3. Графики изменения ИС ΔU разбаланса моста пятизонного ЭЭН-Д во времени τ при: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,161$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,119$ м; $L_4 = 0,114$ м; $L_5 = 0,11$ м; $\rho_0 = 37,9$ Ом·м; $\alpha_T = -0,009$ 1/°C, при $\rho_t(\theta_c) = \rho_0(1 + \alpha_T \cdot \theta_c)$; 1 – $G = 0$ кг/с; 2 – $G = 0,0005$ кг/с; 3 – $G = 0,001$ кг/с; 4 – $G = 0,0015$ кг/с; 5 – $G = 0,002$ кг/с

На рис. 5.3 приведены графики изменения ИС ΔU разбаланса моста пятизонного ЭЭН-Д во времени τ от величины массового расхода G обрабатываемой среды.

Анализ графиков показывает, что при уменьшении величины массового расхода G обрабатываемой среды ИС ΔU разбаланса моста начинает резко возрастать и достигает значений разбаланса моста для проектируемого режима работы за меньшее время нагрева τ [112, с. 287–294].

5.2 Математическое моделирование информационного сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы проточных многозонных электродных электронагревателей-датчиков при наличии отложений на электродах

Значительное влияние на термообработку с.-х. термолabileльных сред при электродном нагреве оказывают отложения на электродах. При обработке молочных продуктов, фруктовых и овощных соков, кормов и пищевых отходов на электродах неизбежны отложения. Под действием высоких температур на компонентах продукта происходят необратимые физико-химические изменения, например,

денатурация белка или карамелизация глюкозы (сахаров). В зависимости от вида продукта и режима обработки отложения бывают нескольких видов. Но по влиянию на электротепловую обработку их можно разделить на две группы [113, с. 192]:

- мягкий пушистый налет из денатурированного белка, который образуется при небольшом перегреве, он легко удаляется;
- пригар, похожий на камень, который состоит из денатурированного белка и волокон клетчатки, сцементированных солями, образуется при сильном перегреве, плохо удаляется.

При электротепловой обработке воды на количество отложений влияют примеси трех групп:

- грубодисперсные (взвешенные частицы песка, глины и других частиц минерального и органического происхождения);
- коллоидно-дисперсные (соединения кремния, алюминия, железа, а также некоторые органические вещества);
- молекулярно- и ионодисперсные (растворенные в воде соли, кислоты, щелочи и газы, в природных водах химический состав определяется в основном ионами Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , HSiO_3^-).

Интенсивность образования отложений зависит от следующих факторов [113, с. 191]:

- плотности тока;
- температуры нагрева обрабатываемой среды;
- наличия застойных зон;
- скорости движения обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве;
- кислотности;
- содержания газов.

По растворимости в воде и в соляной кислоте все отложения можно разделить на три типа. **К первому типу** относятся отложения, не растворимые в воде и не разлагаемые соляной кислотой. В эту группу попадает большинство котельных накипей, а также продукты коррозии металла под действием перегретого водяного пара. **Второй тип** составляют отложения, практически не растворимые в воде, но легко разлагаемые соляной кислотой. К ним относятся так называемые низкотемпературные накипи, в том числе накипи, образующиеся в электрических аппаратах. **Третий тип** составляют отложения, в значительной степени растворимые в воде (например, отложения в пароперегревателях котлов и проточной части паровых турбин).

Образование отложений приводит к трудностям в эксплуатации установки, так как отложения образуют дополнительное электрическое сопротивление на границе электрод–среда и приводят к уменьшению межэлектродного расстояния. Это приводит к перераспределению напряжения и мощности по длине ЭНУ и, соответственно, плотности тока на электродах по всей длине электронагревателя, что вызывает неравномерный нагрев и способствует лавинообразному росту количества отложений на электродах ЭЭН-Д (рис. 5.4). Это приводит к нарушению режима нагрева (определенного технологическими требованиями). Кроме того, отложения ухудшают качество пищевых обрабатываемых продуктов: изменяется их цвет, вкус, запах и т. д.

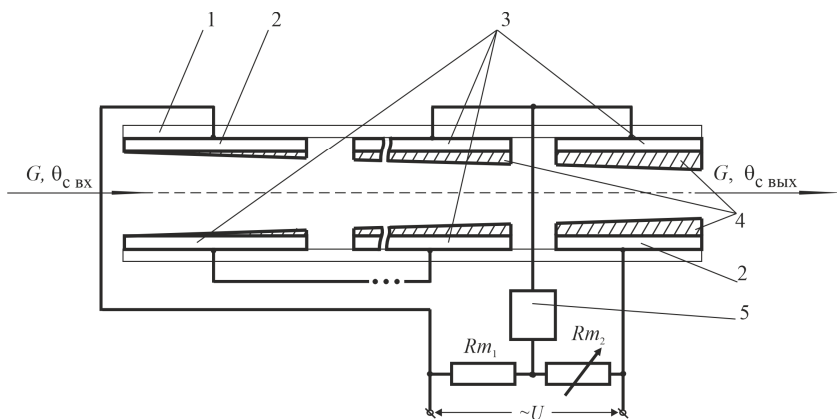


Рис. 5.4. Схема проточного многозонного ЭЭН-Д с отложениями на электродах:
 1 – корпус; 2 – электроды основные токоподводящие; 3 – электроды промежуточные;
 4 – отложения на электродах; 5 – управляющий элемент САР;
 Rm_1, Rm_2 – термозависимые сопротивления измерительного моста

Обзор литературных источников [113, с. 195; 114, с. 10–16; 115, с. 63–69] показывает, что распределение образующихся отложений практически не поддается теоретическому моделированию. Исследования должны проводиться экспериментально, на реальной установке, для конкретных режимов работы, так как при разработке ЭЭН-Д невозможно учесть все факторы, которые влияют на образование отложений на электродах. Некоторые факторы определяются технологическими требованиями, другие зависят

от свойств продукта. Несмотря на это, возможно контролировать количество отложений на электродах и, при достижении их определенного допустимого количества, отключать установку и очищать электроды. Очевидно, что если своевременно удалять отложения, отнесенные к третьей группе, то это не даст им превращаться в сложноудаляемые отложения второй и первой групп. Это повысит надежность работы, улучшит эксплуатацию установки и качество обработки термолабильных сред.

Для моделирования работы проточного многозонного ЭЭН-Д, при наличии отложений карбонатов кальция и магния на его электродах, была изготовлена экспериментальная установка электродного нагревателя воды [116, с. 228–231]. Поскольку толщина отложений на электродах зависит от различных факторов и, как правило, возрастает с увеличением температуры к выходу из ЭЭН-Д, то для определения функции температурной зависимости удельного сопротивления (проводимости) отложений на электродах и распределения их толщины по длине ЭЭН-Д необходимо выделить участки электродов для проведения измерений. Для этого каждый из электродов ЭЭН-Д был разбит на четыре одинаковых участка (рис. 5.5). Электроды разработанного ЭЭН-Д имели следующие размеры: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0,04$ м; $L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = 0,0315$ м; $L_9 = L_{10} = L_{11} = L_{12} = 0,03$ м.

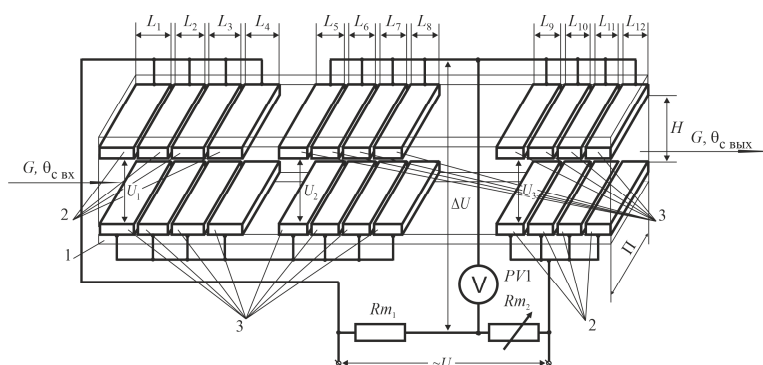


Рис. 5.5. Схема экспериментальной установки проточного многозонного ЭЭН-Д воды для исследования электротепловой обработки при образовании отложений на электродах:

1 – корпус; 2 – электроды основные токоподводящие; 3 – электроды промежуточные; R_{m1} , R_{m2} – сопротивления измерительного моста термонеинвариантные; PV1 – вольтметр

При моделировании образования отложений карбонатов кальция и магния на электродах проточного многозонного ЭЭН-Д воды первоначально проводили замер значений напряжений U_1 , U_2 , U_3 на зонах нагрева, ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы, температуры $\theta_{\text{свых}}$ на выходе и тока I при работе этого ЭЭН-Д без наличия отложений на электродах, а затем в период их образования. При экспериментальных исследованиях подавали водопроводную воду с электрической проводимостью $\gamma_{0\text{с}} = 0,02149 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ и температурным коэффициентом проводимости $\alpha_{\text{пс}} = 0,0274 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, теплоемкостью $C_p = 4174 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ и плотностью $\rho_{\text{с}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, через промежуточный бак таким образом, чтобы поддерживать постоянной величину массового расхода воды $G = 0,003 \text{ кг/с}$. Постоянная величина потока воды поддерживалась путем стабилизации ее уровня в напорном баке. При этом температура воды в баке поддерживалась при помощи вмонтированных в бак ТЭНов, подключенных к питающей электрической сети через терморегулятор. При значении температуры обрабатываемой среды (воды) $\theta_{\text{свх}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ на входе в ЭЭН-Д и величине массового расхода обрабатываемой среды $G = 0,003 \text{ кг/с}$ температура на выходе $\theta_{\text{свых}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ поддерживалась путем регулирования напряжения питания. При работе ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах напряжение питания составило $U = 220 \text{ В}$.

Измерительный мост образован термoneзависимыми сопротивлениями Rm_1 , Rm_2 и термозависимыми сопротивлениями участков ЭЭН-Д, которые вычислялись как сумма сопротивлений зон нагрева – Rm_3 и Rm_4 . При этом с точки соединения термoneзависимых сопротивлений Rm_1 и Rm_2 и второго (по ходу движения обрабатываемой среды) промежуточного электрода снимается ИС ΔU . Измерительный мост балансировался при значении температуры обрабатываемой среды (воды) $\theta_{\text{свых}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ между электродами на выходе ЭЭН-Д. Суммарное значение дополнительных сопротивлений Rm_1 и Rm_2 составляло 6700 Ом . К измерительной диагонали моста подключался электроизмерительный прибор с внутренним сопротивлением $10\,000 \text{ Ом}$.

В ходе эксперимента на электродах ЭЭН-Д образовывались отложения, что привело к изменению напряжений U_1 , U_2 , U_3 на зонах нагрева и ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы. Для стабилизации температуры $\theta_{с.вых}$ на выходе из ЭЭН-Д регулировалось (увеличивалось) напряжение питания U .

Результаты измерения температуры $\theta_{с.вх}$ на входе в ЭЭН-Д, температура $\theta_{с.вых}$ на выходе ЭЭН-Д, напряжений U_1 , U_2 , U_3 на зонах нагрева, напряжение питания U , тока нагревателя I и ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы, через время наработки ЭЭН-Д, от включения без отложений на электродах T_s , представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Электротепловые характеристики ЭЭН-Д при наличии отложений на электродах

Номер измерения	Время наработки ЭЭН-Д T_s , ч	Ток ЭЭН-Д I , А	Температура $\theta_{с.вх}$, на входе ЭЭН-Д, °С	Температура $\theta_{с.вых}$, на выходе ЭЭН-Д, °С	ИС ЭЭН-Д ΔU , В	Напряжение U_1 на 1-й зоне ЭЭН-Д, В	Напряжение U_2 на 2-й зоне ЭЭН-Д, В	Напряжение U_3 на 3-й зоне ЭЭН-Д, В	Напряжение U питания ЭЭН-Д, В
1	0	3,12	20	70	0,0	77	76	67	220
2	30	3,14	20	70	1,2	77	77	68	222
3	60	3,16	20	70	1,5	78	78	69	225
4	90	3,18	20	70	1,7	78	79	70	227
5	120	3,20	20	70	1,9	79	80	71	230
6	150	3,23	20	70	2,2	79	81	72	232
7	180	3,26	20	70	2,4	80	81	74	235
8	210	3,29	20	70	2,6	80	82	75	237
9	240	3,32	20	70	2,8	81	83	76	240
10	270	3,36	20	70	2,9	82	84	77	243
11	300	3,40	20	70	3,0	83	85	78	246

Анализ данных таблицы 5.1 показывает, что при образовании отложений на электродах за 300 ч работы, для компенсации снижения мощности ЭЭН-Д, напряжение питания U увеличилось до значения

$U = 246$ В. При этом ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы увеличился от нуля (0,0 В) до 3,0 В.

При проведении экспериментальных исследований через прозрачные боковые стенки ЭЭН-Д из оргстекла была возможность проводить визуальный контроль образования отложений. Периодически проводилась разборка нагревателя, с последующим измерением расстояния между образовавшимися отложениями и толщины отложений на выходе каждой зоны нагрева между электродами с длиной L_4 , L_8 и L_{12} (см. рис. 5.5) с помощью нутромера микрометрического с боковыми губками НМГ-5-30 0,01 и микрометра МК-25 0,01. Также по величине напряжения и тока определялось общее сопротивление обрабатываемой среды и отложений на участках электродов ЭЭН-Д длиной L_4 , L_8 и L_{12} . С учетом измеренного расстояния между образующимися отложениями определялось сопротивление обрабатываемой среды. Результаты контроля образования отложений на электродах представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Результаты контроля образования отложений на электродах

Номер измерения	Время наработки T_{Σ} ЭЭН-Д, ч	Текущая координата x по длине ЭЭН-Д, м	Толщина отложений $H_{\text{ос}}$ на одном электроде, м	Участок электрода с длиной
1	0	0	0	L_4
2	300	0	0	
3	0	0,16	0	
4	100	0,16	0,000 10	
5	200	0,16	0,000 23	
6	300	0,16	0,000 39	
7	0	0,286	0	L_8
8	100	0,286	0,000 19	
9	200	0,286	0,000 40	
10	300	0,286	0,000 69	
11	0	0,406	0	L_{12}
12	100	0,406	0,000 27	
13	200	0,406	0,000 58	
14	300	0,406	0,000 98	

Проведенные экспериментальные исследования показали, что распределение отложений на электродах при работе электронагревателя происходит неравномерно (см. таблица 5.2). Их количество увеличивается к выходу из электронагревателя. Через 300 ч работы толщина отложений на выходе электронагревателя достигла 0,98 мм.

Значение суммарного электрического сопротивления обрабатываемой среды (воды) на участках ЭЭН-Д длиной L_4 , L_8 и L_{12} с образовавшимися отложениями на электродах $R_{c\text{oc}}$ при температурных значениях $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($R_{c\text{oc}}(20)$) и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($R_{c\text{oc}}(70)$), а также суммарного электрического сопротивления R_c обрабатываемой среды на указанных участках ЭЭН-Д при температурных значениях $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($R_c(20)$) и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, ($R_c(70)$) для различного времени нагрева ЭЭН-Д представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Значения суммарного электрического сопротивления обрабатываемой среды (воды) в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д, вместе с отложениями на электродах $R_{c\text{oc}}$ и обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве, свободном от отложений R_c на участках ЭЭН-Д длиной L_4 , L_8 и L_{12} , для различного времени работы, при $\gamma_0\epsilon = 0,021\ 49\ (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, $\alpha_{\text{п}\epsilon} = 0,0274\ 1/^{\circ}\text{C}$, $\theta_{c\text{вх}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\theta_{c\text{вых}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Участок электрода длиной	Время наработки ЭЭН-Д T_5 , ч	Суммарное сопротивление обрабатываемой среды (воды) вместе с отложениями при $\theta_{c\text{вх}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{c\text{oc}}(20)$, Ом	Сопротивление обрабатываемой среды (воды) при $\theta_{c\text{вх}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_c(20)$, Ом	Суммарное сопротивление обрабатываемой среды (воды) вместе с отложениями при $\theta_{c\text{вых}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{c\text{oc}}(70)$, Ом	Сопротивление обрабатываемой среды (воды) при $\theta_{c\text{вых}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_c(70)$ Ом
L_4	100	113,29	108,97	60,80	57,81
	200	114,01	104,08	62,11	55,22
	300	114,90	98,07	63,71	52,03

Участок электрода длиной	Время наработки ЭЭН-Д T_5 , ч	Суммарное сопротивление обрабатываемой среды (воды) вместе с отложениями при $\theta_{c, \text{вх}} = 20^\circ\text{C}$, $R_{c, \text{ос}} (20)$, Ом	Сопротивление обрабатываемой среды (воды) при $\theta_{c, \text{вх}} = 20^\circ\text{C}$, $R_c (20)$, Ом	Суммарное сопротивление обрабатываемой среды (воды) вместе с отложениями при $\theta_{c, \text{вых}} = 70^\circ\text{C}$, $R_{c, \text{ос}} (70)$, Ом	Сопротивление обрабатываемой среды (воды) при $\theta_{c, \text{вых}} = 70^\circ\text{C}$, $R_c (70)$ Ом
L_8	100	144,49	134,08	78,36	71,13
	200	145,98	124,06	81,03	65,81
	300	148,04	110,22	84,73	58,47
L_{12}	100	152,31	136,77	83,35	72,56
	200	154,62	121,24	87,49	64,32
	300	157,60	101,20	92,84	53,69

Сопротивление отложений на участках ЭЭН-Д определялось как разность между суммарным сопротивлением обрабатываемой среды вместе с отложениями на электродах $R_{c, \text{ос}}$ и сопротивлением обрабатываемой среды R_c между этими электродами (таблица 5.3).

Эти результаты использовались для расчета электрической проводимости отложений при температуре 20°C (γ_{20}) и 70°C (γ_{70}), а затем и для расчета температурного коэффициента проводимости отложений ($\alpha_{\text{п ос}}$). Результаты расчета представлены в таблице 5.4.

Анализ полученных данных (таблица 5.4) показал, что электрическая проводимость $\gamma_{0, \text{ос}}$ и температурный коэффициент проводимости $\alpha_{\text{п ос}}$ отложений на электродах как по длине нагревателя, так и по времени его работы существенно не меняются. Это означает, что при данном режиме нагрева в исследуемом диапазоне образования отложений их структура существенно не меняется.

Значение удельной электрической проводимости и температурного коэффициента проводимости отложений на электродах можно

принять как среднее значение по данным таблицы 5.4 ($\gamma_{0oc} = 0,023\ 86\ (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, $\alpha_{пoc} = 0,010\ 69\ 1/^{\circ}\text{C}$).

Таблица 5.4

Результаты расчета проводимости γ_{0oc} и ТКП отложений $\alpha_{пoc}$
водопроводной воды

Участок электрода длины	Время наработки ЭЭН-Д T_s , ч	Электрическая проводимость при 20 °С γ_{20} , Ом ⁻¹	Электрическая проводимость при 70 °С γ_{70} , Ом ⁻¹	Удельная проводимость отложений γ_{0oc} , (Ом·м) ⁻¹	Температурный коэффициент проводимости отложений $\alpha_{пoc}$, 1/°С
L_4	100	0,0289675	0,0417520	0,0238537	0,0107191
	200	0,0289891	0,0417209	0,0238964	0,0106558
	300	0,0288544	0,0415430	0,0237789	0,0106722
L_8	100	0,0289318	0,0417222	0,0238156	0,0107412
	200	0,029465	0,0424031	0,0242898	0,0106531
	300	0,0285081	0,0411062	0,0234688	0,0107361
L_{12}	100	0,0286981	0,0413161	0,0236509	0,0106702
	200	0,0294847	0,0424725	0,0242896	0,0106941
	300	0,0287541	0,0413947	0,0236979	0,0106681

Для оценки линейной взаимосвязи исследуемого параметра от совокупности других используется коэффициент множественной корреляции. Однако при исследовании образования отложений на электродах при работе ЭЭН-Д, для выбора вида уравнения регрессии, необходима независимая оценка линейности распределения отложений по длине ЭЭН-Д и в зависимости от времени его наработки. Поэтому оценку линейности проводили при помощи коэффициентов парной корреляции R . Для оценки отклонения

зависимости толщины отложений на электродах по длине ЭЭН-Д от линейной, для различного времени работы $R(x, T_S)$, использовалось выражение:

$$R(x, T_S) = \frac{N_{m(x)} \cdot \sum (x \cdot H_{\text{ос } m(x)}) - (\sum x \cdot \sum H_{\text{ос } m(x)})}{\sqrt{N_{m(x)} \cdot \sum (x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{N_{m(x)} \cdot \sum (H_{\text{ос } m(x)}^2) - (\sum H_{\text{ос } m(x)})^2}}, \quad (5.2)$$

где $m(x)$ – номер измерения в эксперименте на расстоянии x от начала ЭЭН-Д (таблица 5.5);

Таблица 5.5

Результаты расчета коэффициентов парной корреляции зависимости толщины отложений на электродах $H_{\text{ос}}$ по длине x ЭЭН-Д от времени наработки T_S и толщины отложений во времени его работы T_S , на различной длине x ЭЭН-Д, при нагреве воды

Номер измерения по длине ЭЭН-Д, $m(x)$	Координата длины x от начала ЭЭН-Д, м	Номер измерения во времени наработки $m(T_S)$			Коэффициенты парной корреляции зависимости толщины отложений во времени наработки T_S на различной длине ЭЭН-Д x
		$H_{\text{ос } m(x)}, \text{ м,}$ при $T_S = 100 \text{ ч}$	$H_{\text{ос } m(x)}, \text{ м,}$ при $T_S = 200 \text{ ч}$	$H_{\text{ос } m(x)}, \text{ м,}$ при $T_S = 300 \text{ ч}$	
		1	2	3	
1	0,16	0,000 10	0,000 23	0,000 39	$R(T_S, 0,16) = 0,994 72$
2	0,286	0,000 19	0,000 40	0,000 69	$R(T_S, 0,286) = 0,994 88$
3	0,406	0,000 27	0,000 58	0,000 98	$R(T_S, 406) = 0,995 91$
Коэффициенты парной корреляции зависимости толщины отложений по длине ЭЭН-Д x , для различного времени наработки T_S		$R(x, 100) = 0,999 64$	$R(x, 200) = 0,999 84$	$R(x, 300) = 0,999 99$	

$H_{\text{ос } m(x)} = H_{\text{ос}}$ – толщина отложений на одном электроде, полученная в результате измерения $m(x)$ эксперимента, на расстоянии x от начала ЭЭН-Д (см. таблицу 5.2);

$N_{m(x)}$ – количество измерений в эксперименте на расстоянии x от начала ЭЭН-Д ($N_{m(x)} = 3$, (см. таблицу 5.2).

Корреляционный анализ данных изменения толщины отложений по длине ЭЭН-Д (см. таблицу 5.2) приведен в таблице 5.5.

При расчете коэффициента парной корреляции, зависимости толщины отложений на электродах во времени наработки $R(T_S, x)$ на различной длине ЭЭН-Д используется формула

$$R(T_S, x) = \frac{N_{m(T_S)} \cdot \sum (H_{\text{ос } m(T_S)} \cdot T_S) - \left(\sum H_{\text{ос } m(T_S)} \cdot \sum T_S \right)}{\sqrt{N_{m(T_S)} \cdot \sum (H_{\text{ос } m(T_S)}^2) - \left(\sum H_{\text{ос } m(T_S)} \right)^2} \cdot \sqrt{N_{m(T_S)} \cdot \sum (T_S^2) - \left(\sum T_S \right)^2}}, \quad (5.3)$$

где $N_{m(T_S)}$ – количество измерений в эксперименте за время наработки T_S ЭЭН-Д ($N_{m(T_S)} = 3$, см. таблицу 5.2);

$m(T_S)$ – номер измерения в эксперименте за время наработки T_S ЭЭН-Д (таблица 5.5);

$H_{\text{ос } m(T_S)} = H_{\text{ос}}$ – толщина отложений на одном электроде, полученная в результате измерения $m(T_S)$ эксперимента, за время наработки T_S ЭЭН-Д (см. таблицу 5.2);

T_S – время наработки ЭЭН-Д от его включения без отложений до соответствующего замера отложений на электродах, ч.

Корреляционный анализ данных изменения толщины отложений во времени наработки ЭЭН-Д (см. таблицу 5.2) приведен в таблице 5.5.

Для математического описания изменения распределения толщины отложений $H_{\text{ос}}$ по длине электродов x и в зависимости от времени наработки ЭЭН-Д T_S можно использовать уравнение регрессии второго порядка с двумя независимыми переменными x и T_S , которое в общем виде запишется следующим образом:

$$H_{\text{ос}} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot T_S + A_4 \cdot T_S^2 + A_5 \cdot x \cdot T_S, \quad (5.4)$$

где $A_0, A_1, A_2, \dots, A_5$ – коэффициенты уравнения регрессии распределения отложений по длине электродов для различного времени наработки ЭЭН-Д;

x – координата длины от начала ЭЭН-Д, м.

Для нахождения коэффициентов $A_0, A_1, A_2, \dots, A_5$ (выражение (5.4)), математическая формулировка задачи будет сводиться к минимизации суммы квадратов отклонений Z_{x, T_S} толщины отложений на электроде, полученных в результате эксперимента $H_{\text{э ос м}}$ (см. таблицу 5.2) и толщины отложений на электроде, полученных при расчете $H_{r \text{ ос м}}$ по формуле (5.4):

$$Z_{x, T_S} = \sum_{m=1}^{N(x, T_S)} (H_{\text{э ос м}} - H_{r \text{ ос м}})^2 \rightarrow \min, \quad (5.5)$$

где $N(x, T_S)$ – количество измерений в эксперименте;

m – номер измерения в эксперименте (см. таблицу 5.2);

$H_{\text{э ос м}} = H_{\text{э ос}}$ – толщина отложений на одном электроде, полученная в результате m -го измерения эксперимента (см. таблицу 5.2);

$H_{r \text{ ос м}} = H_{r \text{ ос}}$ – толщина отложений на одном электроде, полученная при расчете по формуле (5.4).

При поиске значений коэффициентов распределения отложений по длине электродов для различного времени наработки ЭЭН-Д необходимо варьировать значениями $A_0, A_1, A_2, \dots, A_5$ таким образом, чтобы толщина отложений, рассчитанных по уравнению (5.4) с определенной погрешностью, приблизилась к толщине отложений, полученных в эксперименте (см. таблицу 5.2). Поиск значений $A_0, A_1, A_2, \dots, A_5$ произведен при помощи функции «Поиск решения» в пакете Excel. Результаты расчета коэффициентов уравнения (5.4) представлены в таблице 5.6.

С учетом численных значений коэффициентов (таблица 5.6), толщина отложений на одном электроде ЭЭН-Д $H_{r \text{ ос}}$ описывается следующим уравнением:

$$H_{r\text{ oc}} = -1,313\,02 \cdot 10^{-4} \cdot x - 4,127\,54 \cdot 10^{-9} \cdot T_S + \\ + 1,257\,01 \cdot 10^{-10} \cdot T_S^2 + 7,582\,79 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot T_S. \quad (5.6)$$

Таблица 5.6

Результаты расчета коэффициентов уравнения (5.4)

Коэффициент	Значение коэффициента
A_0	0
A_1	-1,31302E-04
A_2	0
A_3	-4,12754E-09
A_4	1,25701E-10
A_5	7,58279E-06

Относительное несовпадение экспериментальных и расчетных значений толщины отложений обрабатываемой среды на электродах δ_H определялось по формуле

$$\delta_H = \left(\left| H_{r\text{ oc}} - H_{\text{ oc}} \right| / H_{\text{ oc}} \right) 100 \%. \quad (5.7)$$

Графики изменения толщины отложений на электродах $H_{\text{ oc}}$ ($H_{\text{ oc}}$ и $H_{r\text{ oc}}$) многозонного ЭЭН-Д по его длине x при нагреве воды приведены на рис. 5.6.

Графики изменения толщины отложений на электродах $H_{\text{ oc}}$ ($H_{\text{ oc}}$ и $H_{r\text{ oc}}$) 1-й, 2-й и 3-й зон нагрева ЭЭН-Д во время его наработки T_S при нагреве воды, приведены на рис. 5.7.

Суммарная толщина отложений в межэлектродном пространстве на двух электродах j -й секции ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$H_{\text{ oc } j} = 2H_{r\text{ oc } j}, \quad (5.8)$$

где $H_{\text{ oc } j}$ – толщина отложений в межэлектродном пространстве на двух электродах j -й секции ЭЭН-Д, м.

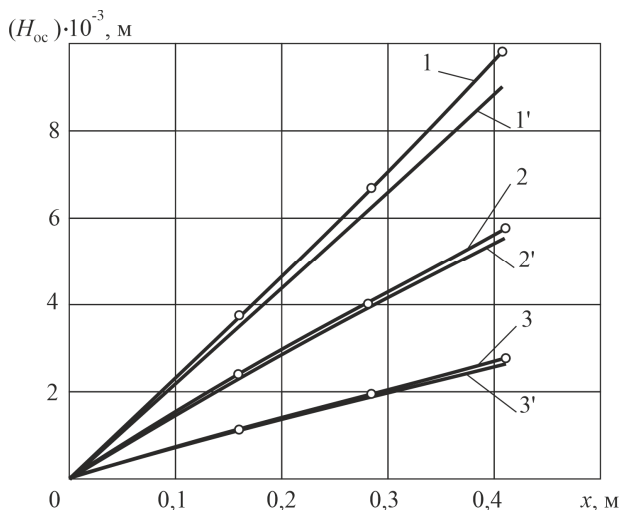


Рис. 5.6. Экспериментальные 1, ..., 3 и расчетные 1', ..., 3' графики изменения толщины отложений на электродах H_{oc} ($H_{э oc}$ и $H_{r oc}$) 1-, 2- и 3-й зон нагрева многозонного ЭН-Д по его длине x при нагреве воды:
1, 1' – $T_S = 300$ ч; 2, 2' – $T_S = 200$ ч; 3, 3' – $T_S = 100$ ч

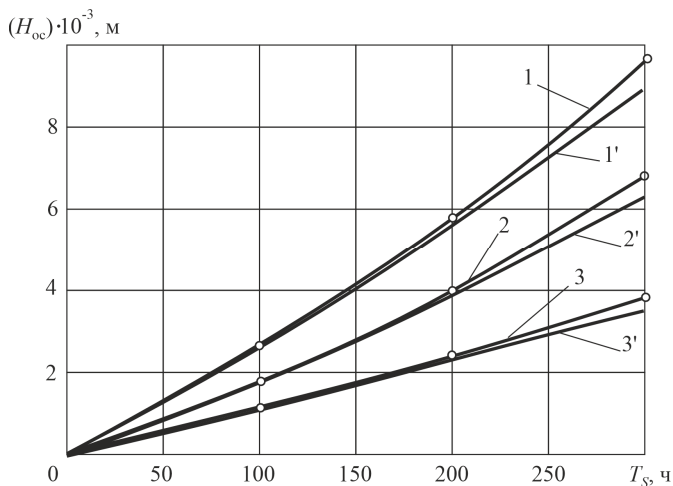


Рис. 5.7. Экспериментальные 1, ..., 3 и расчетные 1', ..., 3' графики изменения толщины отложений на электродах H_{oc} ($H_{э oc}$ и $H_{r oc}$) 1-, 2- и 3-й зон нагрева многозонного ЭН-Д во время его наработки T_S при нагреве воды:
1, 1' – $x = 0,406$ м; 2, 2' – $x = 0,286$ м; 3, 3' – $x = 0,16$ м

Межэлектродное расстояние на секциях ЭЭН-Д, свободное от отложений, рассчитывается по формуле

$$H_{c\,j} = H - H_{oc\,j}, \quad (5.9)$$

где $H_{c\,j}$ – межэлектродное расстояние на j -й секции электронагревателя, свободное от отложений, м;

H – межэлектродное расстояние ЭЭН-Д, м.

Гидравлический диаметр $D_{гп}$ свободного от отложений межэлектродного пространства j -й секции электронагревателя – это отношение четырех площадей поперечного сечения потока обрабатываемой среды к смоченному периметру поперечного сечения потока [117, с. 9]. Для j -й секции электронагревателя он вычисляется по формуле

$$D_{гп} = \frac{2 \cdot H_{c\,j} \cdot \Pi}{H_{c\,j} + \Pi}. \quad (5.10)$$

Скорость обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве $v_{c\,j}$ на j -й секции ЭЭН-Д находим из выражения

$$v_{c\,j} = \frac{G}{\rho_c \cdot H_{c\,j} \cdot \Pi}. \quad (5.11)$$

Коэффициент Прандтля [118, с. 54] при температуре обрабатываемой среды находим из выражения

$$Pr_c = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad (5.12)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости [118, с. 321], Па · с;

λ – коэффициент теплопроводности [118, с. 321], Вт/(м · °С).

Коэффициент Прандтля при температуре отложений обрабатываемой среды находим из выражения

$$Pr_{oc} = \frac{C_{p oc} \cdot \mu}{\lambda}, \quad (5.13)$$

где $C_{p oc}$ – удельная теплоемкость отложений обрабатываемой среды на электродах ЭЭН-Д [119, с. 36], Дж/(кг·°C).

Критерий Рейнольдса [118, с. 54] находим из выражения

$$Re = \frac{\rho_c \cdot D_{\Pi} \cdot v_{cj}}{\mu}. \quad (5.14)$$

Увеличение толщины отложений H_{ocj} , на j -х секциях электронагревателя (на выходе из ЭЭН-Д до 0,000 98 мм) приводит к уменьшению свободной от отложений части межэлектродного пространства. При постоянном массовом расходе обрабатываемой среды $G = 0,003$ кг/с это приводит к увеличению скорости обрабатываемой среды v_{cj} в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д (на выходе из ЭЭН-Д до 0,018 99 м/с). При этом критерий Рейнольдса Re также увеличится. Для значения температуры обрабатываемой среды $\theta_c = 70$ °C он возрастет до значения $Re = 335,483$. Для расчета критерия Нуссельта Nu , при теплоотдаче с плоской поверхности, с учетом того, что при $Re \leq 2330$ обрабатываемая среда движется в ламинарном режиме [118, с. 73], можно использовать уравнение

$$Nu = 0,33 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_c^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{oc}} \right)^{0,25}. \quad (5.15)$$

Коэффициент теплоотдачи k_0 можно записать на основе уравнения (2.32) [118, с. 54]. После соответствующих преобразований выражение для его вычисления примет вид:

$$k_0 = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{\text{нп}}}, \quad (5.16)$$

где k_0 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

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

$$\begin{cases} C_P \cdot \rho_c \cdot H_{cj} \cdot \Pi \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_P \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U_{cj}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}; \\ C_{P \text{ oc}} \cdot M_{ocj} \cdot \frac{\partial \theta_{oc}}{\partial \tau} = \frac{U_{ocj}^2 \cdot \Pi \cdot h}{\rho_{t \text{ oc}}(\theta_{ocj}) \cdot H_{ocj}} - k_o \cdot F_S \cdot (\theta_{ocj} - \theta_{cj}), \end{cases} \quad (5.17)$$

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

j – номер секции с начала ЭЭН-Д;

η – коэффициент полезного действия, о. е.;

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

θ_{oc} – текущая температура отложений на электродах, °С.

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

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

F – площадь поверхности теплоотдачи отложений j -й секции ЭЭН-Д в обрабатываемую среду, м^2 ;

$\rho_{\text{т ос}}$ – удельное сопротивление отложений на электродах, $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

Во втором уравнении системы (5.17), описывающем тепловыделение в отложениях, выразим массу отложений на j -й секции нагрева через их плотность:

$$M_{\text{ос}j} = \rho_{\text{ос}} \cdot \Pi \cdot h \cdot H_{\text{ос}j}, \quad (5.18)$$

где $\rho_{\text{ос}}$ – плотность отложений на электродах ЭЭН-Д, полученных при нагреве водопроводной воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Площадь теплоотдачи F с поверхности отложений на электродах ЭЭН-Д в обрабатываемую среду межэлектродного пространства, выраженная через конструктивные размеры электродной системы:

$$F = 2\Pi \cdot h. \quad (5.19)$$

Тогда уравнение системы (5.17), описывающее тепловыделение в отложениях, с учетом выражений (5.18) и (5.19), запишем следующим образом:

$$C_{p \text{ ос}} \cdot \rho_{\text{ос}} \cdot \Pi \cdot H_{\text{ос}j} \frac{\partial \theta_{\text{ос}}}{\partial \tau} = \frac{U_{\text{ос}j}^2 \cdot \Pi}{\rho_{\text{т ос}} (\theta_{\text{ос}j}) \cdot H_{\text{ос}j}} - 2 \cdot k_o \cdot \Pi (\theta_{\text{ос}j} - \theta_{\text{с}j}). \quad (5.20)$$

В уравнении (5.20) зависимость удельного сопротивления отложений от температуры запишем через их проводимость и ТКП:

$$\rho_{\text{т ос}} (\theta_{\text{ос}j}) = 1 / \left(\gamma_{0 \text{ ос}} \cdot (1 + \alpha_{\text{п ос}} (\theta_{\text{ос}j})) \right), \quad (5.21)$$

где $\gamma_{0 \text{ ос}}$ – удельная электрическая проводимость отложений обрабатываемой среды, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$;

$\alpha_{\text{п ос}}$ – температурный коэффициент проводимости отложений обрабатываемой среды, $1/^\circ\text{C}$.

Для установившегося режима нагрева, при $\partial\theta_{oc} / \partial\tau = 0$, уравнение (5.14), с учетом выражения (5.15), запишем следующим образом:

$$U_{ocj}^2 \frac{\Pi}{H_{ocj}} \gamma_{0oc} (1 + \alpha_{noc}(\theta_{ocj})) - 2k_o \cdot \Pi(\theta_{ocj} - \theta_{cj}) = 0. \quad (5.22)$$

Раскрыв скобки и выполнив арифметические преобразования из уравнения (5.22), выражаем температуру отложений θ_{ocj} на j -й секции ЭЭН-Д, которая зависит от температуры обрабатываемой среды θ_{cj} в межэлектродном пространстве j -й секции ЭЭН-Д:

$$\theta_{ocj} = \left(\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc}}{2k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{cj} \right) / \left(1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc} \cdot \alpha_{noc}}{2k_o \cdot H_{ocj}} \right). \quad (5.23)$$

Напряжение на секциях ЭЭН-Д в обрабатываемой среде, свободного от отложений межэлектродного пространства, рассчитывается по формуле

$$U_{cj} = U_{zk} \cdot R_{cj} / (R_{cj} + R_{ocj}), \quad (5.24)$$

где U_{zk} – значение напряжения k -й зоны ЭЭН-Д, В;

k – номер зоны ЭЭН-Д;

R_{cj} – значение сопротивления обрабатываемой среды между электродами на j -й секции электронагревателя, Ом;

R_{ocj} – значение сопротивления отложений на обоих электродах j -й секции электронагревателя, Ом.

Напряжение на отложениях для каждой секции ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$U_{ocj} = U_{zk} \cdot R_{ocj} / (R_{cj} + R_{ocj}). \quad (5.25)$$

Сопротивление отложений на обоих электродах j -й секции ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$R_{ocj} = \rho_{t\ oc}(\theta_{ocj}) \cdot H_{ocj} / (h \cdot \Pi). \quad (5.26)$$

Сопротивление обрабатываемой среды в свободном от отложений межэлектродном пространстве ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$R_{cj} = \rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj} / (h \cdot \Pi). \quad (5.27)$$

Сопротивление каждой секции ЭЭН-Д равняется сумме сопротивлений отложений и обрабатываемой среды на этой секции

$$R_j = R_{ocj} + R_{cj}. \quad (5.28)$$

Напряжение на зонах ЭЭН-Д зависит от сопротивления зон R_{zk} и рассчитывается по формуле

$$U_{zk} = I \cdot R_{zk}. \quad (5.29)$$

Ток ЭЭН-Д рассчитывается по формуле

$$I = U / R, \quad (5.30)$$

где R – суммарное сопротивление ЭЭН-Д (Ом), рассчитываемое по формуле

$$R = \sum_{k=1}^N R_{zk}. \quad (5.31)$$

Сопротивление зон ЭЭН-Д определяется сопротивлением параллельно соединенных секций R_j (формулы (5.26)...(5.28)) и рассчитывается по формуле

$$R_{zk} = \int_0^{L_k} \frac{\rho_{t\ oc}(\theta_{ocj}) \cdot H_{ocj} + \rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}{h \cdot \Pi} dx. \quad (5.32)$$

Запишем систему уравнений, позволяющую найти совместное решение первого уравнения системы (5.17) и уравнения (5.23) для определения распределения температуры в обрабатываемой среде θ_c и в отложениях обрабатываемой среды θ_{oc} на электродах:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p \cdot \rho_c \cdot H_{cj} \cdot \Pi \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U_{cj}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}; \\ \theta_{ocj} = \left(\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{cj} \right) \left/ \left(1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc} \cdot \alpha_{noc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} \right) \right.; \\ U = \sum_{k=1}^N U_{zk} = \sum_{k=1}^N I \cdot R_{zk}; \\ I = U / R; \\ R = \sum_{k=1}^N R_{zk}; \\ H_{r_{ocj}} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot T_s + A_4 \cdot T_s^2 + A_5 \cdot x \cdot T_s; \\ H_{ocj} = 2H_{r_{ocj}}; \\ R_{ocj} = H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) / (h \cdot \Pi); \\ R_{cj} = H_{cj} \cdot \rho_t(\theta_{cj}) / (h \cdot \Pi); \\ U_{ocj} = U_{zk} \cdot R_{ocj} / (R_{cj} + R_{ocj}); \\ U_{cj} = U_{zk} \cdot R_{cj} / (R_{cj} + R_{ocj}); \\ R_{zk} = \int_0^{L_k} \frac{H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) + H_{cj} \cdot \rho_t(\theta_{cj})}{h \cdot \Pi} dx. \end{array} \right. \quad (5.33)$$

Для решения первого уравнения системы (5.33) запишем его в следующем конечно-разностном виде [70, с. 255–256]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H_{cj} \cdot \Pi \frac{\theta_{cj}^{n+1} - \theta_{cj}^n}{\tau} + C_p \cdot G \frac{\theta_{cj}^{n+1} - \theta_{cj-1}^{n+1}}{h} = \frac{U_{cj}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}, \quad (5.34)$$

где $\theta_{c j}^{n+1}$ – температура обрабатываемой среды (воды) на j -й секции $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °C;

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

$\theta_{c j-1}^{n+1}$ – температура обрабатываемой среды (воды) на $j - 1$ -й секции $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °C.

Далее преобразуем уравнение (5.34) к следующему виду:

$$\frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j}^n}{\tau} + \frac{G}{\rho_c \cdot H_{c j} \cdot \Pi} \cdot \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j-1}^{n+1}}{h} = F_{c j}^n, \quad (5.35)$$

или с учетом скорости обрабатываемой среды $v_{c j}$ (5.11) в межэлектродном пространстве на j -й секции ЭЭН-Д:

$$\frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j}^n}{\tau} + v_{c j} \cdot \frac{\theta_{c j}^{n+1} - \theta_{c j-1}^{n+1}}{h} = F_{c j}^n, \quad (5.36)$$

где

$$F_{c j}^n = \frac{U_{c j}^2 \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c j}^n) \cdot H_{c j}^2 \cdot C_p \cdot \rho_c}. \quad (5.37)$$

После математических преобразований из уравнения (5.35) получаем следующее разностное уравнение:

$$\theta_{c j}^{n+1} = \frac{\tau \cdot h \cdot F_{c j}^n + h \cdot \theta_{c j}^n + \tau \cdot v_{c j} \cdot \theta_{c j-1}^{n+1}}{h + \tau \cdot v_{c j}}. \quad (5.38)$$

Для решения уравнения (5.38) применяем итерационный процесс, который прекращается при выполнении условия:

$$\max_j \left(\frac{|\theta_{cj}^{m+1} - \theta_{cj}^m|}{\theta_{cj}^m} \right) \leq \varepsilon_0, \quad (5.39)$$

где $j = 1 \dots K_{ZN}$;

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

ε_0 – погрешность вычислений температуры обрабатываемой среды (воды).

Расчет ИС ΔU мостовой измерительной схемы проводится по формуле

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \cdot \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R}, \quad (5.40)$$

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

Rm_1, Rm_2 – термoneзависимые 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.

Анализ динамики электротепловых процессов в многозонном ЭЭН-Д при его работе, в процессе образования отложений обрабатываемой среды на электродах, показал, что на величину ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы существенное влияние оказывает не только температура на выходе из ЭЭН-Д $\theta_{c, \text{вых}}$, но и отложения обрабатываемой среды на электродах. Зафиксировав температуру на выходе из ЭЭН-Д $\theta_{c, \text{вых}}$ (например, поддерживая ее величину при помощи регулятора температуры) из ИС ΔU разбаланса

мостовой измерительной схемы можно выделить составляющую, которая характеризует величину отложений обрабатываемой среды на электродах.

Таким образом, контролируя ИС разбаланса мостовой измерительной схемы, можем определять количество отложений на электродах. При относительно небольшом количестве отложений их влияние на уменьшение мощности ЭЭН-Д можно компенсировать путем изменения напряжения питания ЭЭН-Д. Корректировка напряжения питания проводится по температуре на выходе из последней зоны нагрева (на последней секции) ЭЭН-Д таким образом, чтобы питающее напряжение обеспечивало необходимую мощность нагрева и температуру на выходе ЭЭН-Д. Очистку электродов ЭЭН-Д от отложений обрабатываемой среды необходимо проводить в то время, когда толщина отложений на электродах достигнет определенной величины. ИС разбаланса мостовой измерительной схемы в этом случае (при постоянной температуре на выходе из ЭЭН-Д) будет коррелировать с величиной отложений обрабатываемой среды на электродах. Соответственно, определенное количество отложений на электродах будет соответствовать как определенному времени наработки ЭЭН-Д T_S , так и определенному ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы. Суммарное время наработки T_S ЭЭН-Д, от включения без отложений на электродах до времени остановки для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды, будет определяться с учетом ИС разбаланса мостовой измерительной схемы $T_S = f(\Delta U)$. По достижении значения ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы величины ΔU_{ZAD} необходимо отключить ЭЭН-Д для очистки электродов.

Для определения времени наработки T_S ЭЭН-Д, с момента включения без отложений на электродах до времени остановки для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды, первоначально моделируем работу ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах. При этом измерительный мост балансируется при установившейся температуре на выходе ЭЭН-Д $\theta_{с.вых}$. При увеличении времени наработки T_S ЭЭН-Д происходит увеличение количества отложений на электродах $H_{рос}$. Для предотвращения

нарушения технологического процесса по причине снижения температуры на выходе ЭЭН-Д $\theta_{\text{с.вых}}$, проводится регулирование (увеличение) напряжения питания U_N методом Ньютона.

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

$$\theta_{\text{с.вых}} - \theta_{\text{ZAD}} = F(U_N) \rightarrow 0. \quad (5.41)$$

При проведении корректировки температуры на выходе ЭЭН-Д новое $(n+1)$ -е приближение напряжения питания ЭЭН-Д U_N определяется по формуле

$$U_{N+1} = U_N - \frac{F(U_N)}{F'(U_N)}, \quad (5.42)$$

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

$$F'(U_N) = \frac{F(U_N + \varepsilon_U) - F(U_N)}{\varepsilon_U}. \quad (5.43)$$

Реализация алгоритма с определением времени наработки T_S ЭЭН-Д, до очистки электродов от отложений обрабатываемой среды приведена на рис. 5.8.

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма (см. рис. 5.8) приняты следующие обозначения:

K_{Zk} – номер последней секции k -й зоны ЭЭН-Д

$$\left(K_{Zk} = \sum_{kp=1}^k L_{kp} / h \right),$$

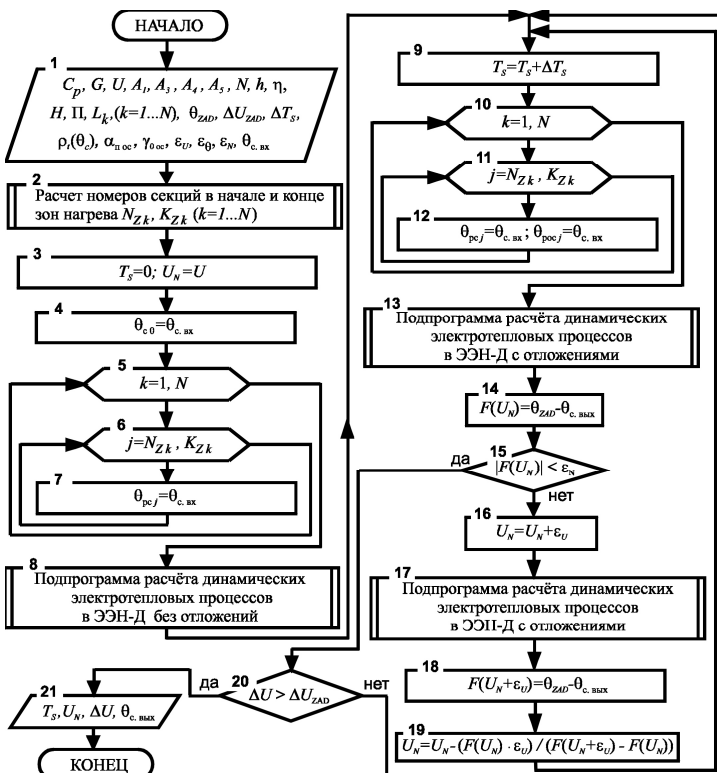


Рис. 5.8. Блок-схема алгоритма расчета времени наработки T_S до отключения ЭЭН-Д для очистки электродов от отложений

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

$N_{zk} = K_{Zk-1} + 1, (k = 2 \dots N)$ – номер первой секции k -й зоны ЭЭН-Д (для 1-й зоны $K_{Z1} = 1$);

ΔT_S – шаг моделирования суммарного времени наработки ЭЭН-Д, ч;
 ε_N – погрешность вычислений разности между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{с,вых}$ и требуемой θ_{ZAD} (заданной требованиями технологического процесса);

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

$\theta_{pcj}, \theta_{rocj}$ – соответственно, температура обрабатываемой среды (воды) и отложений обрабатываемой среды на j -й секции, n -м расчетном (предыдущем) шаге, °C.

В блоке 8 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.8) проводится расчет электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, в блоках 13 и 17 – с отложениями обрабатываемой среды на электродах. Реализация этих расчетов показана на рис. 5.9. При этом для проведения расчета электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах в блоке 6 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.9) расчет сопротивлений обрабатываемой среды R_{cj} , напряжений на электродах U_{cj} и температур в межэлектродном пространстве θ_{cj} проводится по блок-схеме алгоритма, приведенной на рис. 5.10, а), с отложениями – расчет сопротивлений R_{cj} и R_{ocj} , напряжений U_{cj} и U_{ocj} и температур θ_{cj} и θ_{ocj} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭЭН-Д проводится по блок-схеме алгоритма, приведенной на рис. 5.10, б).

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма, приведенной на рис. 5.9, приняты следующие обозначения:

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

FPR – переменная определяющая окончание итерационного расчета температуры обрабатываемой среды при достижении требуемой точности ε_0 ;

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

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

При этом сопротивление зон ЭЭН-Д (см. рис. 5.9, блок 1) определяется сопротивлением параллельно соединенных секций R_{cj} (5.21) и рассчитывается по формуле

$$R_{Zk} = \int_0^{L_k} \frac{\rho_t(\theta_c) \cdot H_{cj}}{h \cdot \Pi} dx. \quad (5.44)$$

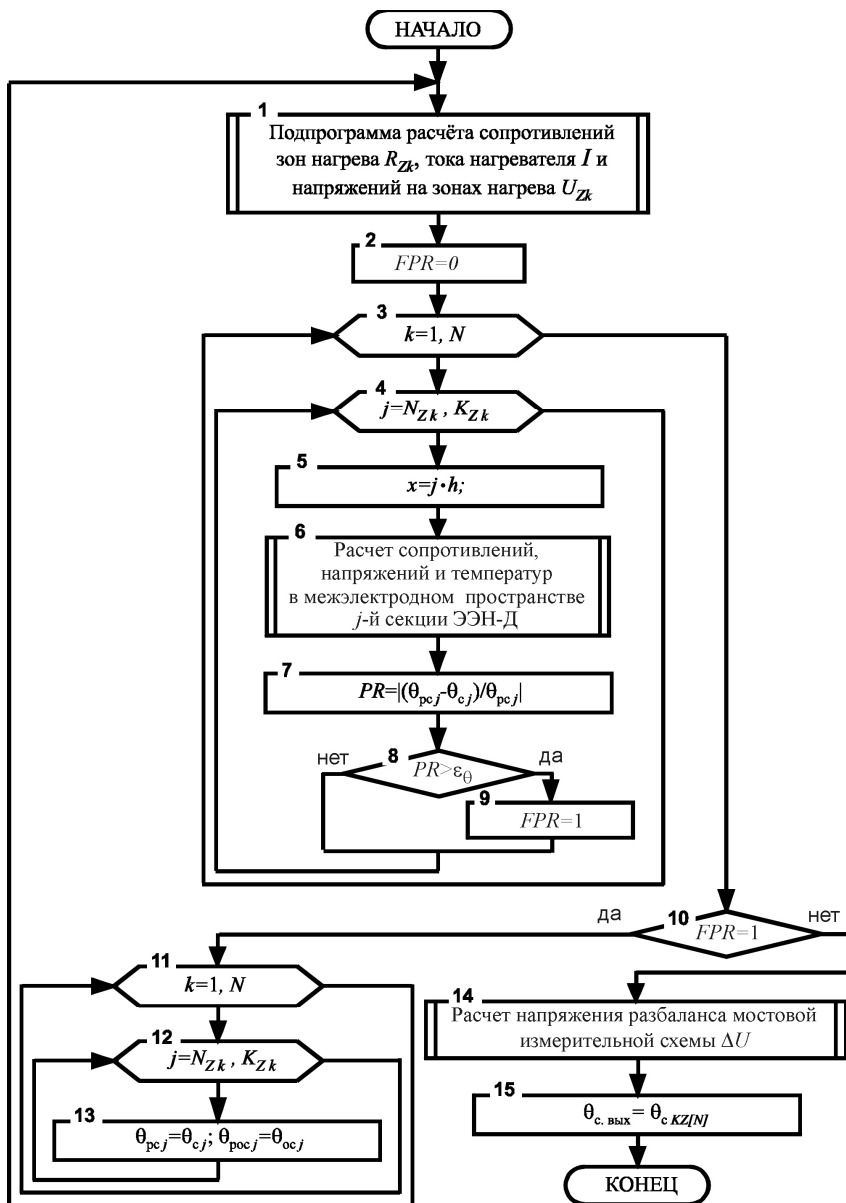
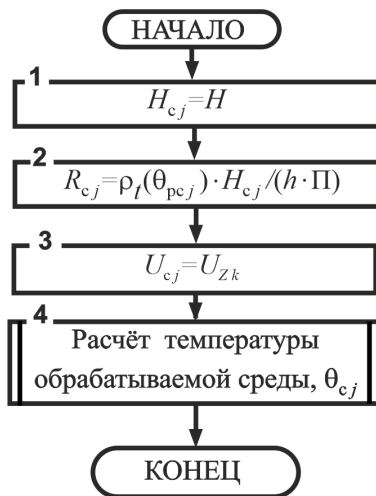
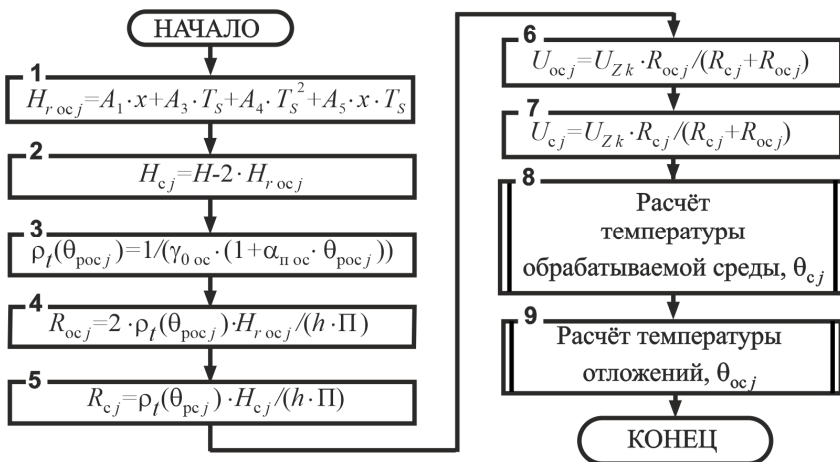


Рис. 5.9. Блок-схема алгоритма расчета температуры $\theta_{с.вых}$ на выходе ЭЭН-Д при его работе с отложениями обрабатываемой среды на электродах



a



б

Рис. 5.10. Блок-схемы алгоритмов подпрограмм расчета сопротивлений R_{cj} напряжений U_{cj} и температур θ_{cj} в обрабатываемой среде j -й секции ЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах (a), сопротивлений R_{cj} и R_{ocj} , напряжений U_{cj} и U_{ocj} и температур θ_{cj} и θ_{ocj} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах (б)

При расчете электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах суммарное сопротивление зон ЭЭН-Д рассчитывается по формуле (5.31), ток ЭЭН-Д – по формуле (5.30), напряжение на зонах – по формуле (5.29).

В блоке 6 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.9) по формуле (5.38) проводится расчет температур обрабатываемой среды в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д при расчете электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, при напряжении на секции U_{cj} , равном напряжению на соответствующей зоне нагрева $U_{cj} = U_{zk}$. Реализация этого расчета показана на рис. 5.10, а).

При работе ЭЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах в блоке 1 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.9) по формулам (5.29)...(5.32) проводится расчет сопротивлений зон нагрева R_{zk} , тока нагревателя I и напряжений зон U_{zk} .

В блоке 6 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.9) проводится расчет сопротивлений R_{cj} и R_{ocj} , напряжений U_{cj} и U_{ocj} и температур θ_c и θ_{oc} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -х секций ЭЭН-Д. Реализация этого расчета показана на рис. 5.10, б).

В блоке 14 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.9) по формуле (5.36) проводится расчет ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы.

В блоке 1 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.10, б)) по формуле (5.6) проводится расчет толщины отложений $H_{r_{oc}}$ на электродах по истечении времени наработки ЭЭН-Д от включения без отложений на электродах до времени T_s остановки для очистки электродов от отложений.

В блоках 8 и 9 блок-схемы алгоритма (см. рис. 5.10, б)) по выражениям (5.38) и (5.23) проводится расчет температур θ_c и θ_{oc} .

Схема лабораторной установки проточного многозонного ЭЭН-Д для исследования электротепловой обработки при образовании отложений на электродах приведена на рис. 5.11.

Экспериментальные и расчетные значения ИС во времени $\Delta U = f(\tau)$ при образовании отложений обрабатываемой среды на электродах в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д, характеризуемого

следующими параметрами: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{0c} = 0,02149$ (Ом·м) $^{-1}$; $\alpha_{nc} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{0oc} = 0,02386$ (Ом·м) $^{-1}$; $\alpha_{noc} = 0,01069$ 1/°C; $G = 0,003$ кг/с; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м 3 ; $\theta_{cвх} = 20$ °C; $\theta_{cвых} = 70$ °C; $\eta = 0,95$, представлены на рис. 5.12.

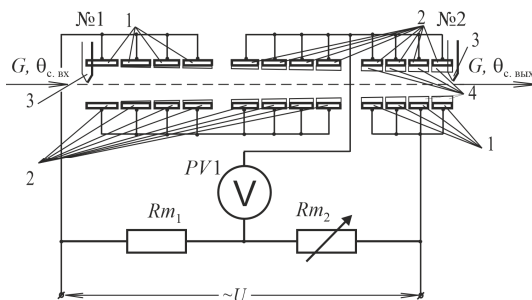


Рис. 5.11. Схема лабораторной установки проточного многозонного ЭЭН-Д для исследования электротепловой обработки при образовании отложений на электродах:

1 – электроды основные токоподводящие; 2 – электроды промежуточные;
3 – термопары; 4 – отложения обрабатываемой среды; PVI – измерительный прибор;
 Rm_1 , Rm_2 – сопротивления измерительного моста термонеинзависимые

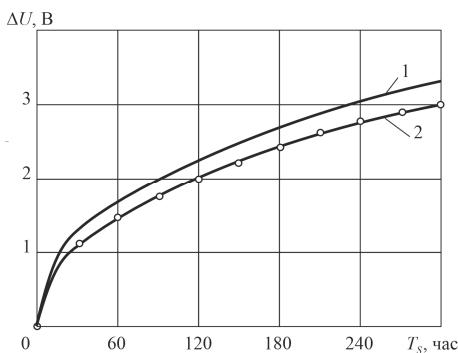


Рис. 5.12. Расчетный 1 и экспериментальный 2 графики изменения ИС $\Delta U = f(\tau)$ (ΔU_s и ΔU_p) в измерительной диагонали моста во времени, при $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{0c} = 0,02149$ (Ом·м) $^{-1}$; $\alpha_{nc} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{0oc} = 0,02386$ (Ом·м) $^{-1}$; $\alpha_{noc} = 0,01069$ 1/°C; $\rho_c = 1000$ кг/м 3 ; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $G = 0,003$ кг/с; $\theta_{cвх} = 20$ °C; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$;

$$Rm_1 + Rm_2 = 6700 \text{ Ом}; R_{pr} = 10000 \text{ Ом}$$

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

5.3 Исследование информационного сигнала непроточных электродных электронагревателей-датчиков с зонированной системой электродов в режиме кипения

Разработка системы управления парогенераторами достаточно сложная задача, поскольку парогенераторы требуют сложной системы управления, особенно на пусковом режиме. Задача автоматизации управления решается сложно, дорого, громоздко и поэтому недостаточно надежно [120, с. 253–264; 121, с. 27–50].

Удельное сопротивление воды описывается зависимостью (2.1) только до наступления заметного парообразования, интенсивность которого зависит от давления и плотности тока на электродах. Пар не является проводником тока, и поэтому при начале пузырькового парообразования первоначально замедляется снижение удельного сопротивления воды, затем, при начале интенсивного парообразования, удельное сопротивление смеси вода–пар начинает возрастать. В расчетах это учитывается коэффициентом влияния парообразования на удельное сопротивление водно-паровой смеси β_n [2, с. 50–51]:

$$\rho_{cn} = \rho_b \cdot \beta_n, \quad (5.45)$$

где ρ_{cn} – удельное сопротивление водно-паровой смеси, Ом·м;
 ρ_B – удельное сопротивление воды без существенного парообразования, Ом·м;

β_n – коэффициент, учитывающий влияние парообразования на удельное сопротивление смеси вода–пар;

$$\beta_n = a_B \cdot e^{k_n \cdot J}, \quad (5.46)$$

где a_B – постоянная, для воды ее значение равно 0,925;

k_n – коэффициент, учитывающий влияние давления в ЭНУ (для с.-х. потребителей, его значение можно принять $k_n = 1,5 \text{ см}^2/\text{А}$);

J – плотность тока на электродах, А/см².

При атмосферном давлении влияние парообразования сказывается при значении температуры выше 75 °С [2, с. 50–51]. Процессы, протекающие при кипении жидкости, достаточно сложные. При электродном электронагреве мощность, расходуемая на парообразование, зависит от удельного сопротивления парообразующей среды. Переход пузырькового режима кипения в пленочный происходит постепенно. При пленочном режиме кипения уменьшается активная площадь электродов за счет интенсивного образования пара, что приводит к прекращению роста мощности, расходуемой на парообразование.

В процессе исследований разработан непроточный ЭЭН-Д, способный контролировать как процесс нагрева, так и режим парообразования [65; 122]. Непроточный ЭЭН-Д содержит три вертикальных плоскопараллельных электрода, два из которых (меньшие) расположены вертикально один над другим, третий – напротив, параллельно им. Меньшие электроды подключены к источнику питания, параллельно которому также присоединены два последовательно соединенных сопротивления, одно из которых – переменное. Вместе с сопротивлениями обрабатываемой среды, находящейся между двумя меньшими электродами и третьим, промежуточным, электродом, образован измерительный мост, подключенный к источнику питания. Измерительная диагональ этого измерительного моста образована между общей точкой соединения двух последовательно соединенных сопротивлений и третьим, промежуточным, электродом.

Для упрощения схемы выделения ИС разбаланса моста в режиме парообразования последовательно каждому из двух последовательно соединенных сопротивлений включен диод, причем к одному сопротивлению диод подключен анодом, к другому – катодом. Непроточный ЭЭН-Д с зонированной системой электродов представлен на рис. 5.13. Мостовая измерительная схема сбалансирована при начальной температуре воды между электродами ЭЭН-Д. После включения ЭЭН-Д у верхнего электрода среда прогревается быстрее и будет иметь меньшее сопротивление, чем у нижнего, что приведет к разбалансу измерительного моста. Изменение ИС в режиме нагрева среды и в режиме парообразования представлено на рис. 5.14.

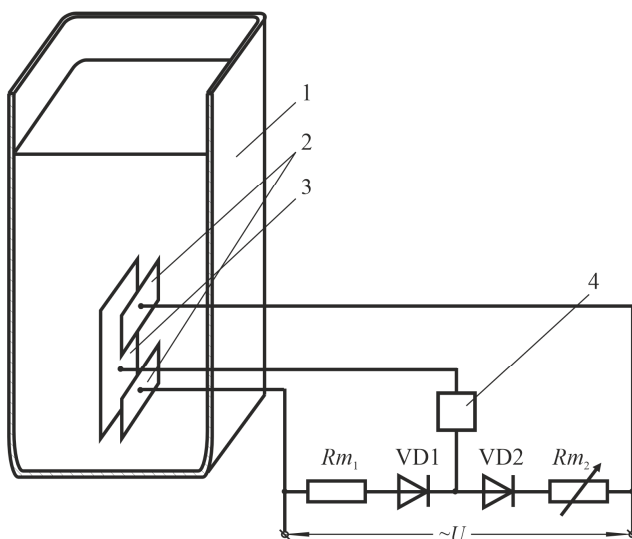


Рис. 5.13. Электротепловая схема непроточного ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой при работе в режиме кипения:
 1 – емкость; 2 – электроды основные токоподводящие; 3 – электрод промежуточный;
 4 – управляющий элемент САР;
 Rm_1 , Rm_2 – сопротивления измерительного моста термoneзависимые

В период начала кипения у верхнего электрода начинают образовываться пузырьки пара, которые увеличивают сопротивление смеси вода–пар и приводят к уменьшению величины ИС разбаланса

моста (рис. 5.14) ($\tau_n < \tau < \tau_{\Pi}$). При интенсивном парообразовании у верхнего электрода смесь вода-пар имеет большее сопротивление, чем у нижнего электрода, и измерительный мост разбалансируется в другую сторону (см. рис. 5.14) ($\tau > \tau_{\Pi}$). Проведенные исследования показывают, что применение ЭЭН-Д позволяет упростить схему управления парогенератором, снизить ее стоимость и повысить надежность работы.

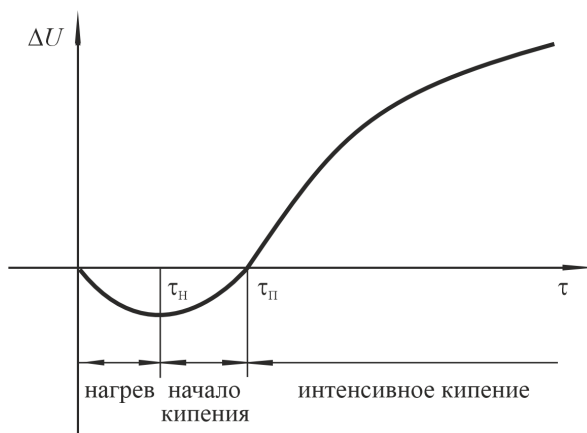


Рис. 5.14. График изменения ИС ΔU при переходе режима работы ЭЭН-Д от нагрева к кипению

Подытоживая результаты исследования, изложенные в этой главе, можно констатировать следующее:

1. Выполнение ЭЭН-Д одновременно функций нагревателя и датчика температуры не только упрощает систему автоматического регулирования температуры ЭНУ, но и придает им дополнительные свойства multifunctionality, 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 [14, с. 27–28].

2. При снижении величины массового расхода обрабатываемой среды многозонного ЭЭН-Д увеличивается температура среды и уменьшается время ее нагрева. При этом ИС ΔU разбаланса моста, равное ИС разбаланса моста при проектируемом режиме работы,

достигается также за меньшее время, имеющее явно выраженную нелинейную зависимость от изменения массового расхода среды. Кроме того, при уменьшении массового расхода обрабатываемой среды ИС ΔU разбаланса моста резко возрастает и существенно превышает значение разбаланса для проектируемого режима работы [14, с. 27–28; 112, с. 287–294].

3. Проведенные экспериментальные исследования отложений на электродах многозонного ЭЭН-Д при нагреве воды показали зависимость их отложений как по длине x , так и по времени наработки T_s ЭЭН-Д [109, с. 23–31].

4. По мере роста отложений на электродах ЭЭН-Д происходит снижение мощности его нагрева и увеличение ИС ΔU разбаланса мостовой измерительной схемы, что свидетельствует о возможности контроля отложений на электродах ЭЭН-Д [109, с. 23–31].

5. 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 [109, с. 23–31; 14, с. 23–28; 116, с. 228–231].

6. Использование ЭЭН-Д в парогенераторах позволяет контролировать процесс парообразования, а также упростить схему управления парогенератором, снизить ее стоимость и повысить надежность работы [41, с. 9–11; 65; 124].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнология / В.А. Карасенко, Е.М. Заяц, А.Н. Баран, В.С. Корко. – Минск : Колос, 1992.
2. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – Минск : Колос, 1975. – 384 с.
3. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М. А. Прищепов. – Минск : БАТУ, 1999. – 295 с.
4. Герасимович, Л.С. Разработка научно-технических основ низкотемпературного поверхностно-распределенного электронагрева в сельском хозяйстве : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.20.02 / Л.С. Герасимович. – Челябинск, 1982. – 45 с.
5. Заяц, Е.М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов / Е.М. Заяц. – Минск : Ураджай, 1997. – 216 с.
6. Рутковский, И.Г. Совершенствование электродных электронагревателей текучих термолабильных сред применением секционированных и зонированных электродных систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / И.Г. Рутковский. – Минск, 2024. – 307 с.
7. 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. / БГАТУ. – Минск, 2006. – С. 69–71.
8. Патент ВУ 2048, МПК6 H05B 3/60 (1995.01). Электронагреватель текучих токопроводящих сред : № 2635 : заявлено 26.12.94 : опубл. 30.03.98 / Герасимович Л.С., Прищепов М.А., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ». – 4 с.
9. Патент ВУ 14337, МПК H05B 3/60 (2009.01). Электронагреватель текучей токопроводящей среды : № а 20090519 : заявлено 13.04.2009 : опубл. 27.01.2011 / Прищепов М.А., Кубарко А.Н., Рутковский И.Г., Рутковская Н.В., Околот М.С., Тукайло П.Н.; заявитель: УО «БГАТУ». – 6 с.
10. Прищепов, М.А. Повышение эффективности электротепловой обработки термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Материалы, технологии, инструменты. – 1997. – № 1. – С. 52–55.
11. 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.

12. 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. / БГАТУ. – Минск, 2013. – С. 308–312.

13. 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. / БГАТУ. – Минск, 2020. – С. 496–498.

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

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

16. Кудрявцев, И.Ф. Исследование электродного нагрева для тепловой обработки кормового картофеля / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко, П.П. Цыбульский // Механиз. и электриф. социалистич. сел. хоз. – 1975. – № 8. – С. 28–30.

17. Авторское свидетельство Чехословакия 268941, МПК4 H05B 3/48. Система электрической электродной трехфазной отопительной системы с неподвижными электродами : заявлено 30.04.87 : опубл. 12.09.89 / Kraft Frantisek. – 3 с.

18. Патент ВУ 3159, МПК H05B 3/60 (1981.01). Электронагреватель токопроводящих сред : № 961105 : заявлено 05.12.96 : опубл. 30.12.99 / Герасимович Л.С., Прищепов М.А., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ». – 6 с.

19. 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.

20. 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.

21. Niemand, E. Grundsatzliches zum Betrib von Elektrodenkesseln zum Beheizen von Gebauden und Schwimmbadern / E. Niemand, H.J. Wirthwein // Elektrowarme Int. – 1974. – № 4. – S. 194–197.

22. Рущиц, А.А. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Рущиц, Е.И. Щербакова // Вестник Южно-Урал. гос. ун.-т. Сер.: Пищевые и биотехнологии. – Челябинск, 2014. – Том 26. – № 1. – С. 9–15.

23. Наний, Е.П. Исследование и разработка электродных нагревателей для животноводческих ферм колхозов и совхозов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Е.П. Наний. – М., 1962. – 18 с.

24. Авторское свидетельство SU 1711786, МПК5 А23К 1/12. Устройство для приготовления пищевых продуктов : № 4603378, заявл. 09.11.88; опубл. 15.02.92 / Каптур З.Ф. – 3 с.

25. Авторское свидетельство SU 106069, МКИ 23 а,1. Аппарат для нагревания и плавления вязких молочных продуктов : 550323; заявл. 30.03.56; опубл. 24.06.57/ Суриков В.Д., Мельников А.Н. – 3 с.

26. Патент ФРГ 3428621, МПК4 Н05В 3/60 (1985.01). Аппарат для термообработки мясного фарша : заявл. 03.08.84; опубл. 13.02.86 / VEB Wissenschaftlich-technisch-ökonomisches Zentrum den Fleischindustrie. – 2 с.

27. Карасенко, В.А. Исследование электропроводности влажных кормов на промышленной частоте / В.А. Карасенко, П.П. Цыбульский // Пути совершенствования сельскохозяйственной техники. – Минск : Ураджай, 1974. – Вып. 2. – С. 92–97.

28. Авторское свидетельство SU 1743544, МПК5 А23N 17/00. Устройство для электроконтактной обработки грубых кормов : заявл. 15.10.90; опубл. 29.06.92 / Багаев А.Н. – 3 с.

29. Авторское свидетельство SU 880403, МПК3 А23N 17/00. Устройство для электротермической обработки кормов : № 2863526; заявл. 07.01 80; опубл. 26.08.81 / Карасенко В.А., Заяц Е.М. – 2 с.

30. Патент ВУ 12951, МПК Н05В 3/60 (2009.01). Электронагреватель токопроводящей жидкой среды, в частности, воды или обратного молока :

№ а 20080129 : заявлено 06.02.2008 : опубл. 28.02.2010 / Прищепов М.А., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ». – 7 с.

31. Авторское свидетельство SU 858725, МПКЗ А23К 1/12. Способ обработки грубых кормов : № 2863527; заявл. 07.01.80; опубл. 06.08.81 / Карасенко В.А., Баран А.Н. – 2 с.

32. Авторское свидетельство SU 1542530, МПК5 А23N 17/00. Устройство для обеззараживания и обогащения кормов : № 4431226; заявл. 27.05.88; опубл. 23.04.90 / Новиков Н.Н. – 3 с.

33. Авторское свидетельство SU 1717088, МПК5 А23N 17/00. Устройство для обеззараживания кормового сырья : № 4805610; заявл. 21.03.90; опубл. 07.03.92/ Языкбаев Е.С. – 3 с.

34. Авторское свидетельство SU 1561941, МПК5 А23N 17/00. Способ обеззараживания жидких кормов и устройство для его осуществления : № 4437492; заявл. 07.06.88; опубл. 07.05.90 / Колесникова Т.Н. – 3 с.

35. Авторское свидетельство SU 1209140, МПК4 А23К 1/121. Электрофлотационный аппарат для обработки сока травы : № 3667905; заявл. 14.09.83; опубл. 07.02.86 / Матков Б.М. – 3 с.

36. Заяц, Е.М. Электроэрозия материалов в картофельном соке / Е.М. Заяц, И.Б. Ющенко. // Проблемы развития энергетики и электрификации АПК: сб. науч. тр. / БелНИИагроэнерго. – Минск, 1994. – С. 67–71.

37. Авторское свидетельство SU 1161065, МПК4 А23К 1/12. Устройство для обработки соломы на корм : № 3510483; заявл. 05.11 82; опубл. 15.06.85 / Чаусовский Г.А. – 2 с.

38. Авторское свидетельство ФРГ 3215767, МПКЗ С25В 1/26. Система с электролизной камерой для обеззараживания воды : заявл. 28.04.82; опубл. 03.11.83 / Gleich Anmelder E., Hrska A. – 3 с.

39. Кудрявцев, С.В. Исследование электрохимического способа получения гипохлорита натрия в электролизере проточного типа / С.В. Кудрявцев, А.А. Бабаев, Л.Н. Фесенко // Изв. вузов. Северо-Кавказ. регион. Техн. науки. – 2000. – № 2. – С. 81–83.

40. Авторское свидетельство SU 429020, МПК1 С01В 11/26. Способ получения гипохлоритов : № 1755715; заявл. 6.03.72; опубл. 5.03.74 / Якименко Л.М. – 2 с.

41. 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.

42. 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.

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

44. Авторское свидетельство SU 1014560, МПКЗ А23N 17/00. Устройство для электротермохимической обработки корма : № 3328247; заявл. 23.07.81; опубл. 30.04.83 / Кошко В.С. – 2 с.

45. Авторское свидетельство SU 1025407, МПКЗ А23N 17/00. Устройство для термохимической обработки кормов : № 3420714; заявл. 09.04.82; опубл. 30.06.83 / Ащеулов А.А., Нюшков Н.В. – 4 с.

46. Авторское свидетельство SU 1482653, МПК4 А23N 17/00. Устройство для электротермической обработки кормов : № 4266408; заявл. 04.05.87; опубл. 30.05.89 / Никитин Ю.П., Винокур И.Л. – 3 с.

47. Авторское свидетельство SU 1706663, МПК5 H05B 3/60. Электродный проточный водонагреватель : № 4783117; заявл. 27.12.89; опубл. 15.01.92 / Стругацкий А.А., Смирнов А.Н. – 3 с.

48. Авторское свидетельство SU 1198767, МПК4 H05B 3/60. Многозонный электродный водонагреватель : № 3753083; заявл. 15.06.83; опубл. 15.12.85 / Алдибеков И.Т. – 2 с.

49. Авторское свидетельство SU 663133, МПК2 H05B 3/60. Электродный нагреватель жидкости : № 2356252; заявл. 26.04.76; опубл. 26.02.79 / Афанасьев Д.Е. – 3 с.

50. Авторское свидетельство SU 1497769, МПК4 H05B 3/60. Электродный нагреватель жидкости : № 4249593; заявл. 27.05.87; опубл. 30.07.89 / Барков В.Н. – 3 с.

51. Авторское свидетельство SU 961161, МПКЗ H05B 3/60. Устройство для управления установкой электродного нагрева токопроводящей среды : № 3246270; заявл. 11.02.81; опубл. 9.08.82 / Карасенко В.А., Заяц Е.М. – 3 с.

52. Патент США 3767893 МПК H05B 3/60 (1968.09). Способ балансирования величины электрического тока : № 175816; заявл. 30.08.71; опубл. 23.10.73 / Mohegan Lake, Edward J. Zeitlin – 2 с.

53. Авторское свидетельство SU 720831, МПК2 H05B 3/60. Электродный котел : № 1475063; заявл. 31.08.76; опубл. 22.12.79 / Евсеев П.Н. – 4 с.

54. 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.

55. Электротехнологическое оборудование. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / сост.: В.С. Корко, Е.М. Заяц, И.Б. Дубодел. – Минск : БГАТУ, 2020. – 188 с.

56. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. – Минск : Выш. шк., 1984. – 192 с.

57. Старостин, А.А. Технические средства автоматизации и управления : учебное пособие / А. А. Старостин, А. В. Лаптева. – Екатеринбург : Уральский фед. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – 168 с.

58. Старостин, А.А. Специальные температурные измерения : учебное пособие / А.А. Старостин, Е.М. Шлеймович, В.Г. Лисенко. – Екатеринбург : Уральский фед. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. – 168 с.

59. Худяков, П.Ю. Программная компенсация инерции промышленных датчиков температуры в программируемых контроллерах / П. Ю. Худяков, А.Ю. Кисельников, И.М. Старцев // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 120–127.

60. Атрошенко, Ю.К. О влиянии защитной гильзы на погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями / Ю.К. Атрошенко, П.А. Стрижак // Энергетик. – М., 2015. – № 10. – С. 52–55.

61. 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.

62. 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. / БГАТУ. – Минск, 2007. – С. 274–277.

63. 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.

64. Карасенко, В.А. Исследование электропроводности влажных кормов на промышленной частоте / В.А. Карасенко, П.П. Цыбульский // Пути совершенст. с.-х. техники. – Минск : Ураджай, 1974, – Вып. 2. – С. 92–97.

65. Патент ВУ 2840, МПК H05B 3/60 (1981.01). Электронагреватель токопроводящих сред : № 960007 : заявлено 5.01.96 : опубл. 30.06.1999 / Герасимович Л.С., Прищепов М.А., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ». – 7 с.

66. 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.

67. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков – М. : Энергия, 1978. – 2-е изд., перераб. и доп. – 480 с.

68. Современные математические модели конвекции / В.К. Андреев, Ю.А. Гапоненко, О.Н. Гончарова, В.В. Пухначев. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.

69. Денисов, М.С. Технические измерения и приборы : учебно-практическое пособие / М.С. Денисов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 148 с.

70. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.

71. Годунов, С.К. Введение в теорию разностных схем / С.К. Годунов, В.С. Рябенький. – М., 1962 г. – 340 с.

72. Берковский, Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. – Минск : Навука і тэхніка, 1976. – 144 с.

73. Гухман, А.А. Об основах термодинамики / А.А. Гухман. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.

74. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А Самарский. – М. : Наука, 1972. – 735 с.

75. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление для втузов : учебное пособие для втузов. – 13-е изд. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – Т. 2. – 560 с.

76. Матвеев, Н.М. Сборник задач и упражнений по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Н.М. Матвеев. – Минск : Высш. шк., 1977. – 416 с.

77. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – Минск : Колос, 1973. – 193 с.

78. 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.

79. 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.

80. Горбатова, К.К. Биохимия молока и молочных продуктов / К.К. Горбатова. – СПб. : ГИОРД, 2003. – 320 с.

81. Крусь, Г.Н. Технология молока и молочных продуктов / Г.Н. Крусь, А.Г. Храмцов, З.В. Волокитина, С.В. Карпычев; под ред. А.М. Шалыгиной. – Минск : Колос, 2006. – 455 с.

82. Рутковский, И.Г. Изучение зависимости электрофизических характеристик обратного 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.

83. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – Л. : Колос, 1980. – 168 с.

84. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

85. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.

86. Севастьянов, Б.А. Курс теории вероятностей и математическая статистика / Б.А. Севастьянов. – М. : Наука, 1982. – 256 с.

87. Бохан, Н.И. Планирование экспериментов в исследованиях по механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства / Н.И. Бохан, А.М. Дмитриев, И.С. Нагорский. – Горки : БСХА, 1986. – 80 с.

88. Зотеев, В.Е. Прикладной регрессионный анализ. Метод наименьших квадратов. Нелинейное оценивание. Классическая линейная регрессия: лабораторный практикум / В.Е. Зотеев – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 101 с.

89. Гребенникова, И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных : учебно-методическое пособие / И.В. Гребенникова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 124 с.

90. Козина, Е.А. Нормированное кормление животных : учебное пособие [Электронный ресурс] / Е. А. Козина, Т. А. Полева; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2020. – 139 с.

91. 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. / БГАТУ. – Минск, 2009. – С. 192–194.

92. Санитарные правила и нормы 2.1.4. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы СанПиН 10–124 РБ 99 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mshp.gov.by/ohrana/f69c8d0f263870d0.html>. – Дата доступа: 30.03.2022.

93. Ющенко, И.Б. Разработка способа электрокоагуляции белка картофельного сока : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / И.Б. Ющенко. – Минск, 1997. – 164 с.

94. Улиг, Г.Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г.Г. Улиг, Р.У. Реву; пер. с англ.; под ред. А.М. Сухотина. – Л. : Химия, 1989. – 456 с.

95. 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.

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

97. 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.

98. 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.

99. Общество с ограниченной ответственностью: Производственное Объединение ОВЕН [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://owen.ru/product/termopreobrazovateli_soprotivleniya_dts_eh_tipa_ts_m_tsp_vo_vzrizovashishennom_ispolnenii. – Дата доступа: 04.01.2023.

100. 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.

101. Аттетков, А.В. Методы оптимизации / А.В. Аттетков, Г.С. Галкин, В.С. Зарубин ; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.

102. Патент ВУ 3945, МПК7 H05B 3/60 (2000.01). Электронагреватель текучих токопроводящих сред : № 970580 : заявлено 30.10.1997 : опубл. 30.06.2001 / Герасимович Л.С., Прищепов М.А., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ». – 3 с.

103. 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.

104. 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: «Издат. дом «Беларуская навука», 2024. – Вып. 57. – С. 338–343.

105. 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.

106. Прищепов, М.А. Математическое моделирование электро-тепловых 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. Прищепов, М.А. Исследование динамических характеристик непроточных электродных электронагревателей с плоскопараллельной электродной системой / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2024. – № 7. – С. 25–32.

111. 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. / БГАТУ. – Минск, 2019. – С. 180–182.

112. 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. участием им. Г.П. Ерошенко / ФГБОУ ВО Вавиловский ун-т. – Саратов, 2023. – С. 287–294.

113. Маслов, А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей / А.М. Маслов. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 208 с.

114. Балабан-Ирменин, Ю.В. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения (обзор) / Ю.В. Балабан-Ирменин, А.В. Богловский, А.Г. Васина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – Т. 30. – № 3. – С. 10–16.

115. Тищенко, З.В. Исследование интенсивности образования осадка при течении молока в каналах пластинчатого пастеризатора / З.В. Тищенко, Л.В. Гур, В.И. Бондаренко // Пром. технология. – 1981. – № 3. – С. 63–69.

116. 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.

117. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

118. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

119. Михайлов, П.Ю. Методика учета наличия отложений накипи на показания теплосчетчика / П.Ю. Михайлов, А.В. Курах // Вестник Тюмен. гос. ун-та. Физико-математ. моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 34–41.

120. Ковалев, А.П. Парогенераторы / А.П. Ковалев, Н.С. Лелеев, Т.В. Виленский ; под общ. ред. А.П. Ковалева. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.

121. Атрощенко, Ю.К. Автоматизированные системы управления АЭС / Ю.К. Атрощенко, Е.В. Иванова. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014. – 81 с.

122. Патент ВУ 13705, МПК H05B 3/60 (2009.01). Электронагреватель токопроводящих сред : № а 20080474 : заявлено 14.04.2008 : опубл. 29.07.2010 / Прищепов М.А., Кубарко А.Н., Рутковский И.Г.; заявитель: УО «БГАТУ» – 7 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты обработки многофакторного эксперимента

Таблица А.1

Результаты по исследованию влияния солесодержания, кислотности
и температуры на удельное сопротивление обрата

План эксперимента				Значение факторов соответственно условным единицам			Результаты эксперимента			Результаты расчета	
№	x_1	x_2	x_3	x'_{1u} , г/л	x'_{2u} , °Т	x'_{3u} , °С	$\rho_{э1}$, Ом·м	$\rho_{э2}$, Ом·м	$\rho_{э3}$, Ом·м	$\rho_{с1}$, Ом·м	$\rho_{с2}$, Ом·м
1	+1	+1	+1	2,68	55,0	69	0,483	0,489	0,491	0,488	0,512
2	-1	+1	+1	0,68	55,0	69	0,637	0,627	0,627	0,630	0,651
3	+1	-1	+1	2,68	25,0	69	0,586	0,592	0,576	0,585	0,566
4	-1	-1	+1	0,68	25,0	69	0,855	0,860	0,861	0,858	0,800
5	+1	+1	-1	2,68	55,0	25	0,903	0,883	0,883	0,890	0,940
6	-1	+1	-1	0,68	55,0	25	1,278	1,300	1,279	1,286	1,298
7	+1	-1	-1	2,68	25,0	25	1,130	1,120	1,135	1,128	1,100
8	-1	-1	-1	0,68	25,0	25	1,588	1,586	1,579	1,584	1,552
9	1,68	0	0	3,36	40,0	47	0,683	0,695	0,694	0,691	0,668
10	-1,68	0	0	0,00	40,0	47	1,152	1,143	1,121	1,138	1,165
11	0	1,68	0	1,68	65,2	47	0,774	0,773	0,770	0,773	0,702
12	0	-1,68	0	1,68	14,8	47	0,881	0,881	0,897	0,886	0,962
13	0	0	1,68	1,68	40,0	84	0,504	0,515	0,511	0,510	0,524
14	0	0	-1,68	1,68	40,0	10	1,544	1,527	1,503	1,525	1,515
15	0	0	0	1,68	40,0	47	0,878	0,823	0,830	0,844	0,847
16	0	0	0	1,68	40,0	47	0,863	0,817	0,804	0,828	0,847
17	0	0	0	1,68	40,0	47	0,844	0,850	0,852	0,849	0,847
18	0	0	0	1,68	40,0	47	0,840	0,818	0,798	0,819	0,847
19	0	0	0	1,68	40,0	47	0,847	0,848	0,813	0,836	0,847
20	0	0	0	1,68	40,0	47	0,878	0,926	0,912	0,905	0,847

В таблице А.1 использованы следующие обозначения:

x_1, x_2, x_3 – независимые переменные факторы (количество добавленной соли, кислотность и температура обрата, условные единицы;

x'_{1u} – количество добавленной соли NaCl, г/л;

x'_{2u} – кислотность, °Т;

x'_{3u} – температура обраты, °C;

$\rho_{\text{э1}}, \rho_{\text{э2}}, \rho_{\text{э3}}$ – значение удельного сопротивления (отклика) при первой, второй и третьей повторности опытов, Ом·м;

ρ_s – среднее значение удельного сопротивления (отклика), Ом·м;

ρ_p – расчетное значение удельного сопротивления (отклика), Ом·м.

Таблица А.2

Результаты расчета критерия Фишера

Параметры расчета критерия Фишера	Значение параметров расчета критерия Фишера
Дисперсия адекватности математической модели, S^2_{LF}	0,000323
Дисперсия воспроизводимости опытов, S^2_v	0,000256
Критерий Фишера, F	1,26

**Результаты технико-экономической оптимизации параметров
многозонного непроточного электродного
электронагревателя-датчика**

ЭЭН-Д до оптимизации характеризуется следующими параметрами: межэлектродное расстояние $H_1 = H_3 = H_5 = 0,081$ м; $H_7 = H_9 = H_{11} = 0,08$ м; ширина электродов $\Pi = 0,126$ м; длина электродов $L_1 = L_3 = L_5 = L_7 = L_9 = L_{11} = 0,052$ м; толщина корпуса $T_K = 0,01$ м; коэффициенты уравнения $\rho_t = a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot \theta^2$, характеризующие температурную зависимость удельного сопротивления обрата $a_0 = 2,545497$; $a_1 = -0,03142$; $a_2 = 0,000126$; масса $M = 3 \cdot 50$ кг; плотность обрата $\rho_c = 1030$ кг/м³; теплоемкость $C_p = 3978$ кДж/(кг·°C); напряжение питания $U = 220$ В; КПД $\eta = 0,8$; диаметр емкости $D_{\text{вн}} = 0,15$ м.

При технико-экономической оптимизации параметров многозонного непроточного ЭЭН-Д ЭНУ подогрева обрата 150 кг за 30 минут с 10 °C до 38 °C использовались данные: конечный год получения дохода $T = 7$ лет; процентная ставка (норма дисконта) $E = 0,05$ %; стоимость изготовления ЭЭН-Д $K_{\text{ЭЭН-Д}} = 60$ руб; ежегодные эксплуатационные издержки $I_{\text{ЭНУ}} = 100$ руб/год; стоимость материала корпуса (винипласт)¹ $SMK = 10$ руб/кг; плотность винипласта $\rho_c = 1390$ кг/м³; стоимость материала электродов (нержавеющая сталь)² $SME = 34,7$ руб/м². Стоимость системы регулирования, в которой используются инерционные датчики ТСМ или ТСП, $K_{\text{ТС}} = 2798,49$ руб. включает стоимость контроллера AL2-14MR-A³ 1672,42 руб., адаптера AL2-2PT-ADP³ для подключения датчика температуры 825,81 руб., датчика температуры PT-100(TSP-100)³ 94,00 руб., блока питания БП-6А³ 24 В 2,5 А 206,26 руб. стоимость низкоинерционной системы регулирования [41, с. 11] рис. Б.1, управляемой герконовым реле $K_{\text{ГР}} = 53,53$ руб., включает стоимость резистора SQP⁴ 10 кОм, 5 Вт 0,76 руб., резистора⁶ 1,5К, 0,5W 0,05 руб., резистора переменного ППБ-3А⁴ 15 кОм,

Цены на материалы и комплектующие согласно информации поставщиков:

¹ – «А-Полимер» Минск, ул. Платонова 36, 16.01.2023;

² – ООО «БалтикИнокс» г. Минск, ул. Бабушкина, 17А, 16.01.2023;

³ – ООО «ПРОМБАЙ АБРАЗИВ» г. Минск, ул. Фабричная, 22, 16.01.2023.

3 Вт, 12 руб., конденсатора электролитического⁶ 0,47μF, 63V 0,10 руб., кнопки ВА42-ХВ2⁵ 2,31 руб., симистора силового ТС132-50-12³ 40,80 руб., диодного моста 2W10³ 0,54 руб., герконового реле РЭС64А РС4.569.724⁴ 5,30 руб., ИС разбаланса мостовой измерительной схемы с терморезистором $\Delta U_{TC} = 0,011$ В; напряжение срабатывания герконового реле $U_{ГР} = 2,9$ В.

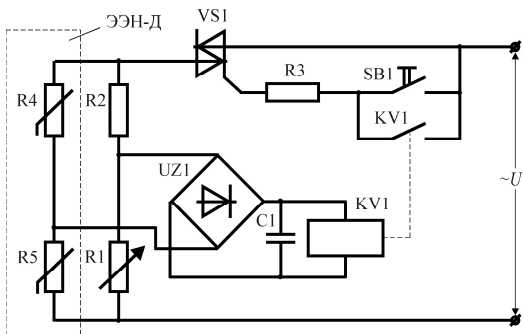


Рис. Б.1. Схема управления ЭЭН-Д [41, с. 11]

Приведенные затраты ЭНУ с ЭЭН-Д до оптимизации составили $Z_{П1} = 3534,65$ руб.

ЭЭН-Д после оптимизации характеризуется следующими параметрами: межэлектродное расстояние $H_1 = H_3 = H_5 = 0,081$ м; $H_7 = H_9 = H_{11} = 0,0800137$ м; ширина электродов $\Pi = 0,12388$ м; длина электродов $L_1 = L_3 = L_5 = 0,053961$ м; $L_7 = L_9 = L_{11} = 0,0517723$ м. Приведенные затраты ЭНУ с ЭЭН-Д после оптимизации составили $Z_{П1} = 3335,60$ руб.

Результаты оптимизации показывают, что предложенная методика оптимизации позволяет обеспечить снижение приведенных затрат ЭНУ с ЭЭН-Д для подогрева 150 кг обрат за 30 минут с 10°C до 38°C на 5,6 %.

Цены на материалы и комплектующие согласно информации поставщиков:

³ – ООО «ПРОМБАЙ АБРАЗИВ» г. Минск, ул. Фабричная, 22, 16.01.2023;

⁴ – ООО «ЧИП и ДИП» г. Минск, ул. Димитрова, 5, 12.01.2023;

⁵ – ООО «Крэзисервис» г. Минск, ул. Карвата, 61, 16.01.2023;

⁶ – «БелЧип» г. Минск, ул. Л. Беды, 2Б, 16.01.2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Схема управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д

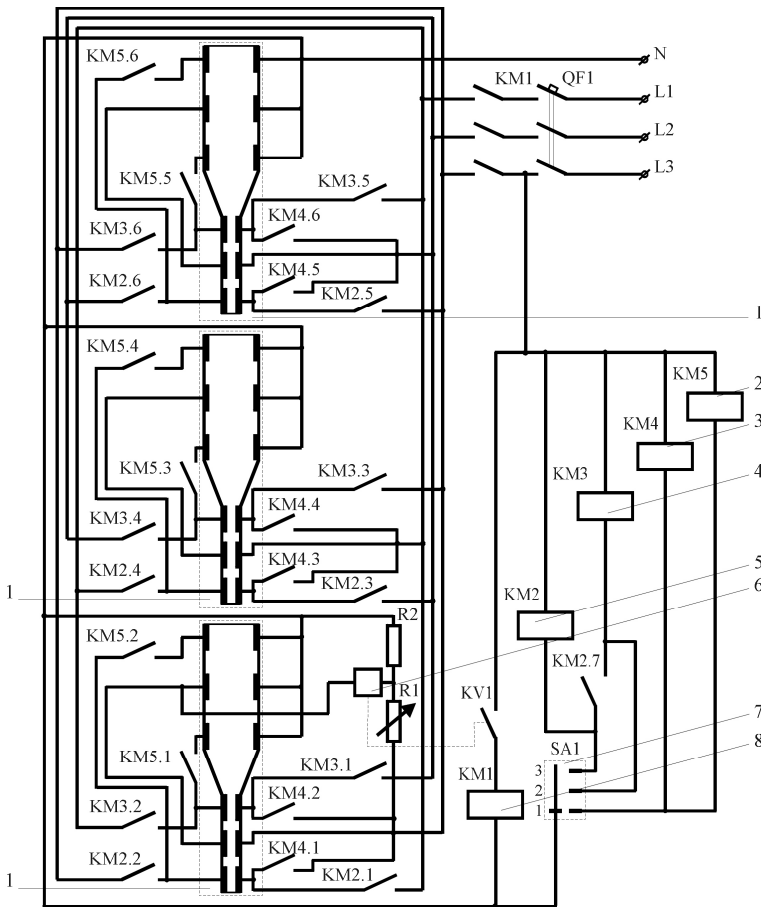


Рис. В.1. Схема управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д для нагрева обраты и воды:
1 – ЭЭН-Д;

- 2, 3 – обмотка магнитного пускателя, обеспечивающего включение нагрева обраты;
- 4 – обмотка магнитного пускателя, обеспечивающего включение нагрева воды на повышенной мощности;
- 5 – обмотка магнитного пускателя, обеспечивающего включение нагрева воды;
- 6 – управляющий орган САР;
- 7 – переключатель, обеспечивающий переключение режима нагрева вода-обрат;
- 8 – обмотка магнитного пускателя, обеспечивающего включение-отключение ЭНУ

Описание работы схемы управления ЭНУ с непроточным ЭЭН-Д

Включение ЭНУ происходит при замыкании контакта промежуточного реле KV1. При этом срабатывает магнитный пускатель KM1, и питающее напряжение подается на ЭЭН-Д. ЭЭН-Д работает в режиме нагрева обраты при первом положении контактов переключателя режимов работы ЭЭН-Д SA1. При этом питающее напряжение подается на магнитный пускатель KM4 и KM5, на третью и девятую зоны нагрева, а также через контакты KM4.1, ... KM4.6 и KM5.1, ... KM5.6 подается на 1, 5, 7, и 11 зоны нагрева.

Для переключения ЭНУ в режим нагрева воды переключатель режимов работы ЭЭН-Д SA1 переводят во второе положение контактов. При этом питающее напряжение 220 В подается на магнитный пускатель KM3, на третью и девятую зоны нагрева, а также через контакты KM3.1, ... KM3.6 линейное напряжение 380 В подается на пятую зону нагрева. При третьем положении контактов переключателя режимов работы ЭЭН-Д SA1 ЭНУ переключается на повышенную мощность подогрева воды. Питающее напряжение 220 В подается на магнитный пускатель KM2, на третью и девятую зоны нагрева, а также через контакт KM2.7 на магнитный пускатель KM3. Через контакты KM2.1, ... KM2.6 и KM3.1, ... KM3.6 линейное напряжение 380 В подается на первую и пятую зоны нагрева.

К фазному электроду третьей зоны нагрева и нулевому электроду девятой зоны нагрева подключены последовательно соединенные переменное и постоянное сопротивление R1 и R2. Эти сопротивления совместно с термозависимым сопротивлением третьей и девятой зон нагрева образуют измерительный мост. Измерительный мост балансируется при холодном состоянии обрабатываемой среды между электродами ЭЭН-Д. Во время нагрева изменяется сопротивление плеч мостовой измерительной схемы. ИС разбаланса моста подается на управляющий орган САР, который при достижении требуемой температуры обрабатываемой среды размыкает контакт промежуточного реле KV1.

Научное издание

Прищепов Михаил Александрович,
Рутковский Иосиф Геннадьевич

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ
ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ ТЕКУЧИХ
ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СРЕД С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ
И ЗОНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Г. В. Анисимова*
Корректор *Г. В. Анисимова*
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*
Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 29.08.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 10,18. Тираж 100 экз. Заказ 169.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.