

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
аграрный университет»

П. П. Проценко

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2024

УДК 631.371:621.362

ББК 31.6

П84

Рецензент

*Наталья Сергеевна Бодруг, кандидат педагогических наук, доцент
кафедры электротехники и автоматизации технологических процессов
Амурского государственного университета*

*Рекомендовано к использованию в учебном процессе
методическим советом электроэнергетического факультета
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Проценко, П. П. Электротехнологии : учебное пособие /
П84 П. П. Проценко ; Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2024. – 175 [1] с.

ISBN 978-5-9642-0609-5

Учебное пособие по дисциплине «Электротехнологии» содержит теоретические сведения о способах преобразования электрической энергии в тепловую. Приведен алгоритм расчета установок. Содержатся задачи для самостоятельной работы, контрольные вопросы по темам, а также тестовые задания по дисциплине.

Учебное пособие предназначено для использования в учебном процессе при проведении практических занятий для бакалавров очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика» (направленность (профиль) подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений») и 35.03.06 «Агроинженерия» (направленность (профиль) подготовки «Электрооборудование и электротехнологии»).

УДК 631.371:621.362

ББК 31.6

ISBN 978-5-9642-0609-5 © Проценко П. П., 2024
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы	7
1.1 Динамика процесса нагрева	8
1.2 Определение мощности электротермических установок	10
Задачи для самостоятельного решения.....	26
Контрольные вопросы	31
2 Определение мощности электроотопительной установки животноводческих помещений.....	32
2.1 Определение мощности электрокалориферной установки	32
Задачи для самостоятельного решения.....	44
Контрольные вопросы	46
3 Электродный нагрев воды.....	47
3.1 Конструктивный расчет электродного водонагревателя	51
3.2 Рабочие характеристики электродных водонагревателей.....	57
Задачи для самостоятельного решения.....	71
Контрольные вопросы	75
4 Косвенный нагрев сопротивлением	76
4.1 Расчет проволочного электрокалорифера	81
4.2 Расчет средств местного обогрева.....	87
Задачи для самостоятельного решения.....	99
Контрольные вопросы	103
5 Установки индукционного нагрева	104
5.1 Расчет индукционных нагревательных установок промышленной частоты	106
5.2 Расчет индукционных нагревательных установок средней и высокой частоты	110
Задачи для самостоятельного решения.....	115
Контрольные вопросы	119
6 Установки диэлектрического нагрева.....	120

6.1 Расчет установок	122
Задачи для самостоятельного решения.....	127
Контрольные вопросы	129
7 Установки инфракрасного нагрева.....	131
7.1 Расчет установок	133
Задачи для самостоятельного решения.....	136
Контрольные вопросы	137
8 Установки сооружений защищенного грунта	138
8.1 Расчет установок	139
Задачи для самостоятельного решения.....	148
Контрольные вопросы	150
Тестовые задания для контроля знаний.....	151
Список рекомендуемой литературы.....	159
Приложение А. Теплотехнические характеристики материалов.....	160
Приложение Б. Параметры нагревательных проводов и кабелей.....	161
Приложение В. Оптимальные параметры микроклимата в животноводческих помещениях.....	162
Приложение Г. Удельный объем помещений	163
Приложение Д. Нормы выделения животных.....	164
Приложение Е. Коэффициенты для определения тепловыделения животными.....	165
Приложение Ж. Нормы местного обогрева животных	166
Приложение И. Электрокалориферные установки.....	167
Приложение К. Характеристики материалов нагревательных элементов	169
Приложение Л. Таблица нагрузок нихромового провода.....	170
Приложение М. Характеристики нагревательных элементов.....	171
Приложение Н. Источники инфракрасного излучения	173
Приложение П. Высокочастотные источники питания	174

ВВЕДЕНИЕ

Электротермия является важной составляющей электротехнологии, изучающей установки по преобразованию электрической энергии в тепловую. Применение тепловой энергии является актуальным вопросом для любой отрасли национального хозяйства, и в большой степени – для предприятий сельского хозяйства. Особую важность приобретает обоснованность использования того или иного способа получения тепла в районах с длительным отопительным периодом.

Электротермические установки предназначены для выполнения определенных технологических операций. Задача проектирования электротермической установки – создание действующего оборудования, которое обеспечивает данный технологический процесс с максимальным использованием возможности установок при минимальных приведенных затратах; создает условия для наибольшей производительности труда обслуживающего персонала; соответствует правилам техники безопасности, правилам устройства и эксплуатации электроустановок; позволяет автоматизировать процесс управления производством и потреблением тепловой энергии.

Целью учебного пособия является использование теоретических сведений в практических расчетах при проектировании электротермических установок. В связи с этим в учебном пособии решаются следующие задачи:

1. Приведены теоретические сведения о принципах действия электротермических установок.
2. Рассмотрены алгоритмы расчета установок для различных производственных процессов.
3. Предложены варианты контроля усвоения материала обучающимися.

Предметом исследования являются физические основы получения тепловой энергии из электрической. *Объектом исследования* выступают производственные процессы с использованием тепловой энергии.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплины «Электротехнологии» и предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика» (направленность (профиль) подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений») и 35.03.06 «Агроинженерия» (направленность (профиль) подготовки «Электрооборудование и электротехнологии»).

Изложенный материал предназначен для проведения практических занятий по дисциплине, а также может быть использован для выполнения выпускной квалификационной работы.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И АЛГОРИТМА РАБОТЫ

Тепловое или термическое действие электрического тока проявляется в электронагреве тел (сред). Электронагрев происходит в результате поглощения веществом электромагнитной энергии. Под воздействием электромагнитного поля свободные или связанные заряды вещества совершают различного рода перемещения. При этом заряды сталкиваются с нейтральными атомами, молекулами или зарядами противоположного знака и отдают им часть своего приобретенного в магнитном поле запаса кинетической энергии. В результате тепловое движение вещества усиливается, что проявляется в повышении его температуры, то есть изменении теплосодержания.

Однако это самая общая картина электронагрева. Электромагнитное поле включает в себя две составляющие. В одних случаях, основным может быть электрическое поле, а магнитное выражено незначительно; в других, имеет место обратная картина; существуют также случаи, когда обе части электромагнитного поля представлены весьма заметно.

По характеру проводимости нагреваемые вещества подразделяют на проводники, полупроводники, диэлектрики. Носителями зарядов в веществе могут быть электроны (проводники первого рода – металлы), ионы (проводники второго рода). Способ подвода электромагнитной энергии к веществу может быть различным.

В зависимости от сочетаний всех указанных условий различают способы электронагрева, отличающиеся конкретным механизмом преобразования электрической энергии в тепловую (хотя в широком плане механизм этого преобразования один): электронагрев сопротивлением; электродуговой, индукционный, диэлектрический, термоэлектрический, световой, электронный нагрев.

1.1 Динамика процесса нагрева

Процесс нагрева любого материала является динамическим процессом, при протекании которого изменяются параметры как самого нагреваемого тела, так и установки в целом.

В общем случае различают проверочный и конструктивный (полный) расчет ЭТУ. Проверочный расчет выполняют для установления возможности использования готовой установки в конкретных (отличающихся от паспортных) условиях эксплуатации. Полный расчет ЭТУ включает:

- 1) тепловой;
- 2) электрический;
- 3) аэродинамический;
- 4) гидравлический;
- 5) механический расчет.

Тепловой расчет электротермических установок проводят с целью определения технических данных установок (мощности, температуры поверхности нагревательных элементов, интенсивности теплоотдачи, параметров тепловой изоляции, термического коэффициента полезного действия), обеспечивающих технологические требования.

Динамика процесса нагрева однородного изотропного тела, обладающего бесконечной теплопроводностью, при условии постоянства мощности нагревателей описывается экспоненциальным уравнением (1.1):

$$\Delta t = \Delta t_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}} \right) + \Delta t_{\text{нач}} e^{-\frac{\tau}{T_n}} \quad (1.1)$$

где Δt – текущее превышение температуры внутри установки над температурой окружающей среды, °С;

Δt_y – установившееся превышение температуры, °С;

$\Delta t_{\text{нач}}$ – начальная температура перегрева, °С;

T_n – постоянная времени нагрева, с;

τ – время от начала процесса нагрева, с.

Физический смысл *установившегося превышения температуры* – разность температур ЭТУ и окружающей среды, при которой вся подводимая к установке мощность идет на потери, то есть дальнейшего повышения температуры не происходит, и термический коэффициент полезного действия (КПД) электротермической установки равен нулю. Установившееся превышение температуры (Δt_y) представляет собой отношение мощности нагрева к полной теплоотдаче установки:

$$\Delta t_y = \frac{P}{A} = \frac{P}{\alpha \cdot F} \quad (1.2)$$

где P – мощность нагрева, Вт;

A – полная теплоотдача ЭТУ, Вт/°С;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

F – площадь поверхности теплоотдачи, м².

Коэффициент конвективной теплоотдачи – количество теплоты, передаваемое в единицу времени с поверхности твердого тела площадью 1 м² при разности температур между твердым материалом и окружающей средой, составляющей 1 °С.

Постоянная времени нагрева электротермической установки показывает, за какое время установка нагрелась бы до установившегося превышения температуры при условии отсутствия потерь в окружающую среду. За время, равное постоянной времени нагрева, в реальных условиях установка нагревается до $0,63 \cdot \Delta t_y$. В общем случае эта величина определяется отношением полной теплоемкости к полной теплоотдаче установки:

$$T_n = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F} = \frac{C_T}{A} \quad (1.3)$$

где m – масса нагреваемого тела, кг;

c – удельная массовая теплоемкость материала, кДж/(°С·кг) (приложение А);

C_T – общая (полная) теплоемкость тела, кДж/°С.

Удельная массовая теплоемкость материала показывает, какое количество теплоты требуется для нагрева одного килограмма материала на 1 °С.

Из уравнения (1.1) можно получить формулу для определения времени нагрева тела τ , с до любой температуры перегрева в пределах от начального превышения ($\Delta t_{\text{нач}}$) до установившегося превышения температуры (Δt_y):

$$\tau = T_n \cdot \ln \frac{\Delta t_y - \Delta t_{\text{нач}}}{\Delta t_y - \Delta t} \quad (1.4)$$

При нагреве от температуры окружающей среды, когда $\Delta t_{\text{нач}} = 0$, это выражение упрощается и имеет следующий вид:

$$\tau = T_n \cdot \ln \frac{\Delta t_y}{\Delta t_y - \Delta t} \quad (1.5)$$

1.2 Определение мощности электротермических установок

Расчетная мощность электротехнической установки ($P_{\text{расч}}$) определяется из уравнения теплового баланса процесса нагрева для установившегося режима (1.6):

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{пол}} + \sum P_{\text{пот}} \quad (1.6)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, кВт;

$\sum P_{\text{пот}}$ – мощность тепловых потерь в окружающую среду (теплопроводностью, конвекцией и излучением), кВт.

Все тепловые процессы связаны либо с нагревом твердых, жидких или газообразных тел, либо с изменением их агрегатного состояния. Поэтому *полезная мощность определяется полезным количеством теплоты, расходуемым на изменение теплосодержания материала и на фазовые превращения (плавление, парообразование).*

Наиболее полное описание этой составляющей можно проследить на процессе преобразования льда с температурой (t_1) в пар с температурой (t_2). В этом случае полезное количество теплоты ($Q_{\text{пол}}$) определится выражением (1.7):

$$Q_{\text{пол}} = m \cdot c_1 \cdot (t_{\text{пл}} - t_1) + m \cdot a_{\text{пл}} + m \cdot c_2 \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{пл}}) + m \cdot a_{\text{п}} + m \cdot c_3 \cdot (t_2 - t_{\text{п}}) \quad (1.7)$$

где m – масса нагреваемого материала, кг;

c_1, c_2, c_3 – удельные массовые теплоемкости соответственно льда, воды и пара, кДж/(кг·°С) (составляют 3,7; 4,19; 2,4 кДж/(кг·°С);

$a_{\text{пл}}, a_{\text{п}}$ – удельная теплота плавления и парообразования соответственно, кДж/кг.

$t_{\text{пл}}, t_{\text{п}}$ – температура плавления и парообразования материала соответственно, °С.

В реальных процессах фазовые превращения могут отсутствовать. В сельскохозяйственных установках чаще всего производится только нагрев материалов и в случае получения пара для тепловой обработки кормов либо для установок отопления помещений учитывается процесс парообразования.

Полезная мощность ЭТУ не зависит от способа нагрева и типа установок. Порядок определения полезной мощности будет зависеть от алгоритма работы установок, которые подразделяются на два вида:

1) **ЭТУ периодического действия** – это установки, в которых материал нагревается порциями за определенный промежуток времени на заданную разницу температур; характеризуются массой одной порции материала (m) и временем нагрева одной порции (τ);

2) **ЭТУ непрерывного действия** – это установки, в которые материал поступает непрерывно и также непрерывно используется, и за время прохождения через такую установку он нагревается от начальной температуры (t_1) до конечной заданной технологическим процессом (t_2); данные установки характеризуются производительностью по нагреваемому материалу (m').

В зависимости от алгоритма работы ЭТУ при нагреве материала полезная мощность определится для установок периодического действия по формуле (1.8) и для установок непрерывного действия (проточных) по формуле (1.9):

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600 \cdot \tau} \quad (1.8)$$

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600} \quad (1.9)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезное количество теплоты, кДж;

τ – расчетное время нагрева, ч;

$q_{\text{пол}}$ – полезная теплопроизводительность установки, кДж/ч.

Полезная теплопроизводительность составит:

$$q_{\text{пол}} = m' \cdot c \cdot \Delta t; \quad q_{\text{пол}} = m' \cdot a_{\text{п}} \quad (1.10)$$

Мощность тепловых потерь ЭТУ в статическом режиме зависит от многих факторов, основными из которых являются:

1) *разность температур внутри установки и окружающей среды (термодвижущая сила):* $\Delta t = t_{\text{вн}} - t_0$;

2) *величина термического сопротивления теплоотдачи (R_T)*, которое представляет собой совокупность термических сопротивлений теплопроводностью (R_{TT}), конвекцией (R_{TK}) и излучением (R_{TI}).

Следует иметь в виду, что определение тепловых потерь для реальных установок необходимо производить поэлементно. Под элементами в данном случае понимают участки ЭТУ, имеющие одинаковые условия теплоотдачи в пределах своей площади и отличающиеся по этим условиям друг от друга.

Одним из способов определения тепловых потерь ЭТУ является *метод электрических схем-аналогов, заключающийся в проведении аналогии между электрическими и тепловыми величинами* (табл. 1.1). Методы расчета электрических цепей применяются для расчета тепловых.

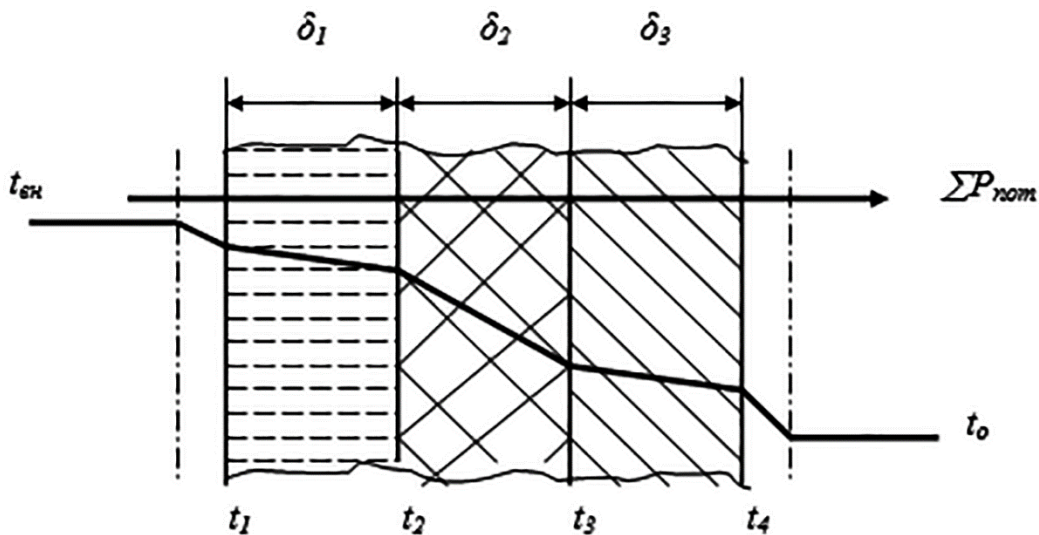
В связи с проведенной аналогией можно сформулировать закон Ома для участка электрической цепи для термической цепи: *суммарный поток тепловых потерь в ЭТУ прямо пропорционален разности температур между внутренней температурой установки и температурой окружающей среды и обратно пропорционален сумме термических сопротивлений:*

$$\sum P_{\text{пот}} = \frac{\Delta t}{\sum R_T} \quad (1.11)$$

Таблица 1.1 – Аналогия между электрическими и тепловыми величинами

Величины	
в электрической цепи	в термической цепи
Электрический ток I , А	Тепловой поток $\sum P_{\text{пот}}$, Вт
Электрический потенциал φ , В	Температура t , °С
Напряжение U , В	Разность температур Δt , °С
Электрическое сопротивление R , Ом	Термическое сопротивление R_T , °С/Вт

Рассмотрим пример определения тепловых потерь для участка трехслойной стенки, представленного на рисунке 1.1.



$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина теплопроводящего слоя, м;
 t_1 и t_4 – температура внутренней и наружной поверхностей печи, °С

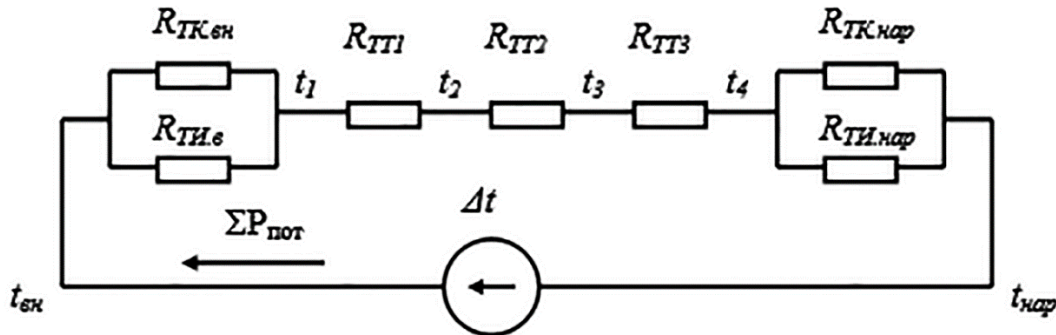
Рисунок 1.1 – Схема участка трехслойной печи

Схема замещения для расчета тепловых потерь в статическом режиме приведена на рисунке 1.2.

В ряде случаев она может быть упрощена. При малых перепадах температур (менее 100 °С) между $t_{\text{вн}}$ и t_1 , а также t_4 и t_0 , можно пренебречь теплопередачей излучением, так как в этом случае преобладающей является теплопередача конвекцией. При больших перепадах температур (более 500 °С) между поверхностями установки теплопередача излучением в несколько раз превышает теплопередачу конвекцией и тогда ею можно пренебречь. Таким

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

образом, получается схема последовательно включенных термических сопротивлений.



Δt – термодвижущая сила (разность температур $t_{вн}$ и t_0), °С; $R_{ТК.вн}$ и $R_{ТК.нар}$ – термическое сопротивление теплопередачи конвекцией, соответственно для внутренней и наружной поверхности ЭТУ, °С/Вт; $R_{ТИ1}$, $R_{ТИ2}$ – термическое сопротивление теплоотдачи излучением для тех же поверхностей, °С/Вт; $R_{ТТ1}$, $R_{ТТ2}$, $R_{ТТ3}$ – термическое сопротивление теплопередачи теплопроводностью, соответственно для первого, второго и третьего слоев, °С/Вт

Рисунок 1.2 – Схема замещения для расчета тепловых потерь

Мощность тепловых потерь в соответствии со схемой замещения определяется (пренебрегаем $R_{ТИ1}$ и $R_{ТИ3} \rightarrow \infty$) выражением (1.12):

$$\sum P_{пот} = \frac{\Delta t}{\sum R_T} = \frac{\Delta t}{R_{ТКвн} + R_{ТТ1} + R_{ТТ2} + R_{ТТ3} + R_{ТКнар}} \quad (1.12)$$

Термическое сопротивление конвективной теплопередачи $R_{ТК}$ составит:

$$R_{ТК} = \frac{1}{\alpha \cdot F} \quad (1.13)$$

где α – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·°С);
 F – площадь конвективной поверхности, м².

Термическое сопротивление теплопроводностью составит:

$$R_{ТТ} = \frac{\delta}{\lambda \cdot F} \quad (1.14)$$

где F – площадь изотермической поверхности теплопроводящего слоя, м²;
 λ – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/(м·°С).

Температуры на отдельных элементах трехслойной стенки (t_1, t_2, t_3, t_4) легко могут быть определены на основе законов электротехники. Так, падение температуры во внутреннем конвективном слое составит:

$$\Delta t_{\text{ТКВН}} = t_{\text{ВН}} - t_1 = \sum P_{\text{ПОТ}} \cdot R_{\text{ТКВН}}$$

Отсюда температура внутренней поверхности печи равна:

$$t_1 = t_{\text{ВН}} - \Delta t_{\text{ТКВН}} = t_{\text{ВН}} - \sum P_{\text{ПОТ}} \cdot R_{\text{ТКВН}}$$

Электротермическая установка характеризуется электрическим КПД ($\eta_{\text{Э}}$), зависящим от способа преобразования электрической энергии в тепловую, и тепловым КПД ($\eta_{\text{Т}}$). **Тепловой КПД нагревательной установки** *показывает, какая доля подводимой к установке мощности расходуется полезно, то есть идет на изменение теплосодержания материала*, и определяется для установок непрерывного действия по формуле (1.15), для установок периодического действия по формуле (1.16):

$$\eta_{\text{Т}} = \frac{Q_{\text{ПОЛ}}}{Q_{\text{ПОЛ}} + P_{\text{ПОТ}} \cdot \tau} = \frac{P_{\text{ПОЛ}}}{P_{\text{ПОЛ}} + P_{\text{ПОТ}}}, \quad (1.15)$$

$$\eta_{\text{Т}} = \frac{Q_{\text{ПОЛ}}}{Q_{\text{ПОЛ}} + Q_{\text{ОГР}} + P_{\text{ПОТ}} \cdot \tau} \quad (1.16)$$

где $Q_{\text{ПОЛ}}$ – полезная теплота, расходуемая на нагрев материала, кДж;

$Q_{\text{ОГР}}$ – теплота, затрачиваемая на нагрев ограждающих конструкций установки, кДж;

$P_{\text{ПОТ}}$ – мощность потерь, кВт;

τ – продолжительность работы установки, с.

Значения термического КПД ЭТУ для некоторых электротепловых установок сельскохозяйственного назначения приведены в таблице 1.2.

Потребная мощность может быть также определена:

1) по тепловому и электрическому КПД:

$$P_{\text{ПОТР}} = \frac{P_{\text{ПОЛ}}}{\eta_{\text{Э}} + \eta_{\text{Т}}} \quad (1.17)$$

1 *Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы*

2) по удельной энергоемкости процесса и производительности установки:

$$P_{\text{потр}} = W_{\text{уд}} \cdot m' \quad (1.18)$$

3) по коэффициенту теплопередачи в окружающую среду:

$$P_{\text{потр}} = \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \quad (1.19)$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С);
 F – площадь теплоотдающей поверхности, м².

Таблица 1.2 – Значения термического КПД электротепловых установок

Установки	Термический КПД
Электрические нагреватели-термосы	0,85–0,95
Проточные элементные водонагреватели	0,95–0,98
Электродные водонагреватели и парогенераторы	0,80–0,95
Электрические калориферы	0,95–1,00
Высокочастотные установки	0,60–0,90
Бытовые электроприборы	0,60–0,80

Определение потребной мощности по удельной энергоемкости ($W_{\text{уд}}$) процесса производится для установок тепловой обработки сельскохозяйственной продукции (запаривание корма, дрожжевание, силосование, пастеризация). Значения удельного расхода электрической энергии для некоторых технологических процессов в сельском хозяйстве приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Удельный расход энергии на некоторые технологические процессы сельскохозяйственного производства

Процессы	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг
Нагрев воды в водонагревателях аккумуляторного типа (кВт·ч/(м ³ ·°С))	1,30
Пастеризация молока (при температуре 71 °С)	0,07
Запаривание картофеля	0,12
Термохимическая обработка грубых кормов	0,14

Оптимальные геометрические размеры установки определяют из условия минимальной поверхности теплоотдачи при заданном объеме. Для установки цилиндрической формы это условие выполняется, если диаметр D цилиндра равен его высоте H .

На величину теплового КПД ЭТУ оказывает влияние толщина слоя тепловой изоляции. **Оптимальная толщина тепловой изоляции определяется, исходя из минимума приведенных затрат на создание теплоизолирующего слоя и на покрытие затрат на электроэнергию:**

$$\delta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\tau_{\Gamma} \cdot \text{Ц}_{\text{Э}} \cdot \lambda \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{10 \cdot \text{Ц}_{\text{И}} \cdot (Z_{\text{А}} + E_{\text{Н}})}} - \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} \right) \cdot \lambda \quad (1.20)$$

где τ_{Γ} – число часов работы установки в течение года;

$\text{Ц}_{\text{Э}}$ – стоимость одного кВт·ч электроэнергии, руб.;

λ – теплопроводность материала тепловой изоляции, Вт/(м·°С);

$\text{Ц}_{\text{И}}$ – стоимость одного кубического метра тепловой изоляции, руб.;

$Z_{\text{А}}$ – годовые отчисления на амортизацию, %;

$E_{\text{Н}}$ – нормативный коэффициент экономической эффективности, %.

К установкам, не требующим тепловой изоляции, можно отнести ЭТУ непрерывного действия и ЭТУ нечастого пользования (с общей продолжительностью работы от 100 до 200 часов в год).

Установленная мощность выбирается выше потребной с учетом коэффициента запаса по формуле (1.21):

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{расч}} \cdot K_{\text{з}} \quad (1.21)$$

где $K_{\text{з}}$ – коэффициент запаса; для электротепловых установок равен 1,1–1,3.

В ряде случаев в задачу расчетов входит определение температуры нагревателя при его известной мощности, полностью идущей на покрытие тепловых потерь, с целью поддержания требуемой температуры какой-либо поверхности, для конкретных условий теплопередачи. В этих случаях площади поверхности теплоизолирующего материала (например, одного слоя) оказываются неодинаковыми на входе и выходе теплового потока потерь. В качестве примера рассмотрим нагревательный провод (рис. 1.3).

Вполне очевидно, что площадь поверхности входа ($F_{\text{вх}}$) потока тепловых потерь от токоведущей жилы в электрическую изоляцию будет значительно

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

меньше, чем площадь поверхности выхода ($F_{\text{ВЫХ}}$) этого же теплового потока из изоляции в окружающую среду. Они определяются следующим образом:

$$F_{\text{ВХ}} = \pi \cdot d \cdot l; F_{\text{ВЫХ}} = \pi \cdot D \cdot l \quad (1.22)$$

где d – диаметр жилы нагревательного провода, м;
 D – диаметр провода, м;
 l – длина провода, м.

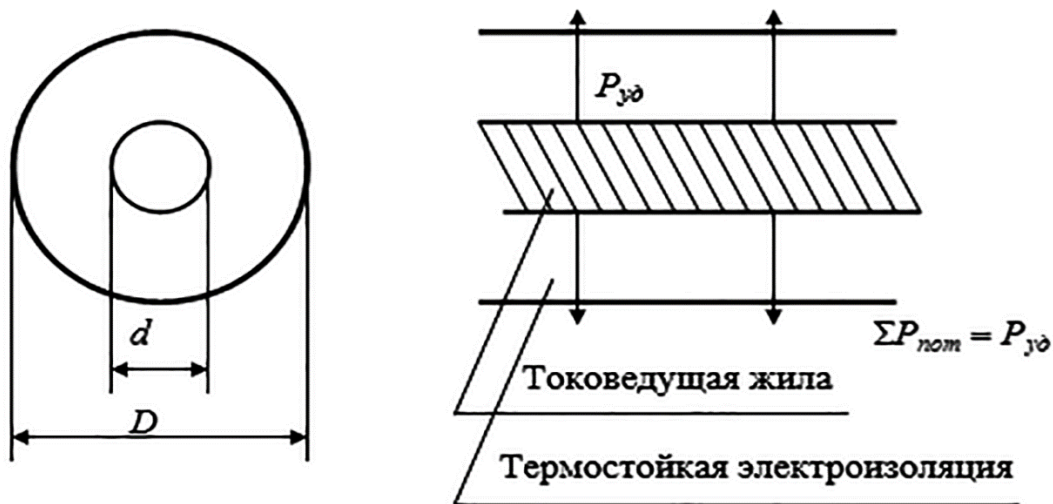


Рисунок 1.3 – Нагревательный провод

Для этого случая, используя аналогию распределения тепловых и электрических полей, можно определить погонное (на один метр длины) термическое сопротивление слоя электрической изоляции, используя формулу (1.23):

$$r_{\text{Тиз}} = \frac{K_{\text{Гиз}}}{\lambda_{\text{и}}} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (1.23)$$

где $K_{\text{Гиз}}$ – геометрический коэффициент изоляции;

$\lambda_{\text{и}}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м·°С).

При расположении нагревательного провода в воздухе общее погонное термическое сопротивление теплопередачи ($r_{\text{Т}}$) будет складываться из погонного термического сопротивления изоляционного слоя ($r_{\text{Тиз}}$) и конвективного термического сопротивления ($r_{\text{ТК}}$), определяемого по формуле (1.24):

$$r_{\text{TK}} = \frac{1}{\alpha \cdot F} = \frac{1}{\alpha \cdot \pi \cdot D} \quad (1.24)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
 F – площадь поверхности провода, м².

Температура жилы провода в этом случае определяется:

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{в}} + P_{\text{пог}} \cdot r_{\text{T}} \quad (1.25)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;
 $P_{\text{пог}}$ – удельная погонная мощность провода, Вт/м.

Нагревательные провода и кабели широко применяются в низкотемпературных процессах сельскохозяйственного производства (для обогрева больших площадей). Промышленностью выпускаются одножильные нагревательные провода марок ПОСХВ, ПНВСВ, ПОСХП, ПОСХВТ; кабели марок КНМСС, КНМСН и другие. Технические характеристики нагревательных проводов приведены в приложении Б.

В случае расположения нагревательных проводов в массе бетонного пола общее погонное термическое сопротивление будет складываться из трех составляющих, если задана температура воздуха ($t_{\text{в}}$), и из двух составляющих, если задана температура поверхности пола ($t_{\text{пов}}$) (рис. 1.4):

$$\begin{aligned} r_{\text{T}} &= r_{\text{Tиз}} + r_{\text{Tбет}} + r_{\text{TK}}; \\ r_{\text{T}} &= r_{\text{Tбет}} + r_{\text{TK}} \end{aligned} \quad (1.26)$$

Из аналогии распределения тепловых и электрических полей можно записать величину геометрического коэффициента тепловой передачи от поверхности нагревательного провода через бетон к поверхности пола (1.27) и погонное термическое сопротивление теплопроводности через бетон (1.28):

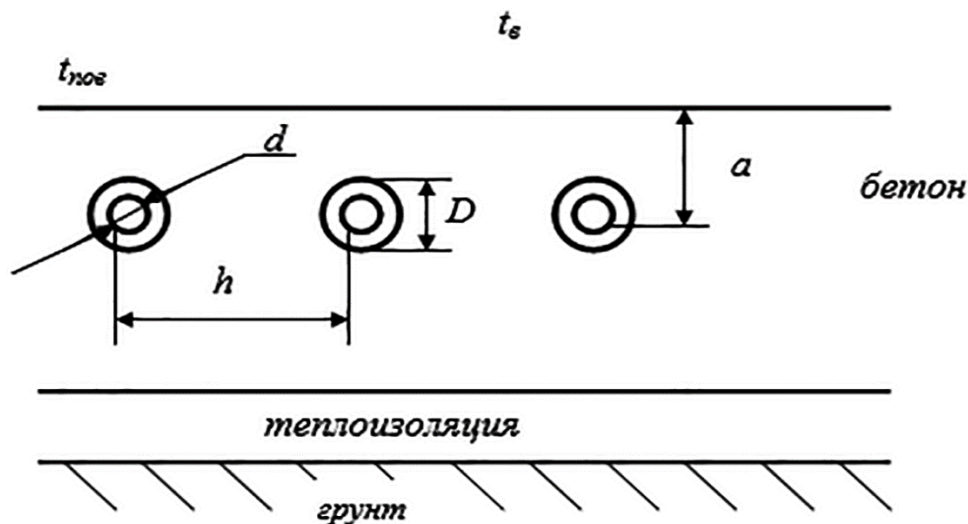
$$K_{\text{Гб}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h}{\pi \cdot D} \cdot Sh \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{h} \right), \quad (1.27)$$

$$r_{\text{Tбет}} = \frac{K_{\text{Гб}}}{\lambda_{\text{б}}} = \frac{\ln \left(\frac{2 \cdot h}{\pi \cdot D} \cdot Sh \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{h} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{б}}} \quad (1.28)$$

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

где Sh – гиперболический синус ($Shx = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$);

λ_6 – теплопроводность бетона, Вт/(м·°C).



d – диаметр жилы провода, м; D – диаметр провода с изоляцией, м;
 h – шаг укладки нагревательного провода, м; a – глубина укладки провода в бетон, м

Рисунок 1.4 – Размещение нагревательного провода в электрообогреваемом полу

Пример 1. Определите тепловые потери через стенки электрической печи, если стенка состоит из огнеупорного кирпича толщиной $\delta_1 = 100$ мм, шлаковаты толщиной $\delta_2 = 200$ мм, стального листа толщиной $\delta_3 = 3$ мм, имеющих соответственно коэффициенты теплопроводности $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, равные 0,685; 0,73 и 43 Вт/(м·°C); температура наружного воздуха $t_{нар} = 20$ °C; температура внутри печи $t_{вн} = 500$ °C. Площадь поверхности теплоотдачи $F = 2$ м². Коэффициент конвективной теплоотдачи для внутренней поверхности печи ($\alpha_{вн}$) и для наружной поверхности печи ($\alpha_{нар}$) равен соответственно 49 и 19 Вт/(м²·°C).

Определите температуры на границах слоев стенки и на ее наружной поверхности. При расчете необходимо считать площадь теплопередачи для всех слоев одинаковой и равной F .

Решение: Для определения тепловых потерь воспользуемся методом электрических схем-аналогов. Так как площадь теплопередачи для всех слоев принимается одинаковой, то схема замещения (рис. 1.2) будет представлять

собой последовательную цепь с тремя термическими сопротивлениями теплопроводности (трехслойная печь) и двумя термическими сопротивлениями конвекции (на внутренней и наружной поверхностях).

Так как разность температуры внутри печи и температуры наружного воздуха составляет $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($500 - 20$) и не превышает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, тепловыми потерями излучением можно пренебречь, то есть $R_{ТИ.вн} = 0$ и $R_{ТИ.нар} = 0$.

В соответствие с законом Ома, для термической цепи суммарные тепловые потери составят:

$$\sum P_{\text{пот}} = \frac{\Delta t}{\sum R_T}$$

$$\sum R_T = R_{TKвн} + R_{TT1} + R_{TT2} + R_{TT3} + R_{TKнар}$$

где $\sum R_T$ – сумма термических сопротивлений, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Термические сопротивления теплопроводности разных слоев стенки печи ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) определяются следующим образом:

$$R_{TT1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot F} = \frac{0,1}{0,685 \cdot 2} = 0,073;$$

$$R_{TT2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2 \cdot F} = \frac{0,2}{0,73 \cdot 2} = 0,137;$$

$$R_{TT3} = \frac{\delta_3}{\lambda_3 \cdot F} = \frac{0,003}{43 \cdot 2} = 0,000035$$

Термические сопротивления внутреннего и наружного конвективных слоев ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) определяются следующим образом:

$$R_{TKвн} = \frac{1}{\alpha_{вн} \cdot F} = \frac{1}{49 \cdot 2} = 0,010204;$$

$$R_{TKнар} = \frac{1}{\alpha_{нар} \cdot F} = \frac{1}{19 \cdot 2} = 0,026315$$

$$\sum R_T = 0,010204 + 0,073 + 0,137 + 0,000035 + 0,026315 = 0,246554$$

$$\text{Тогда } \sum P_{\text{пот}} = \frac{480}{0,246554} = 1947 \text{ Вт}$$

Температуры на границах слоев стенки (t_2 , t_3) и на ее внутренней (t_1) и наружной (t_4) поверхностях ($^{\circ}\text{C}$) определяются аналогично определению потенциалов в электрической цепи:

$$t_1 = t_{\text{вн}} - \sum P_{\text{пот}} \cdot R_{\text{ТКвн}} = 500 - 1947 \cdot 0,010204 = 480;$$

$$t_2 = t_1 - \sum P_{\text{пот}} \cdot R_{\text{ТТ1}} = 480 - 1947 \cdot 0,073 = 338;$$

$$t_3 = t_2 - \sum P_{\text{пот}} \cdot R_{\text{ТТ2}} = 338 - 1947 \cdot 0,137 = 72;$$

$$t_4 = t_3 - \sum P_{\text{пот}} \cdot R_{\text{ТТ3}} = 72 - 1947 \cdot 0,000035 = 71;$$

$$t_{\text{нар}} = t_4 - \sum P_{\text{пот}} \cdot R_{\text{ТКнар}} = 71 - 1947 \cdot 0,026315 = 20$$

Расчет температуры окружающей среды показал правильность расчетов.

Пример 2. Рассчитайте тепловые потери печи, предназначенной для нагрева цинковых стержней диаметром $d = 100$ мм; длиной $l = 260$ мм; число деталей $n = 9$. Между тепловой изоляцией и деталями предусмотрен зазор величиной $\delta_0 = 110\text{--}140$ мм; продолжительность нагрева $\tau = 1,5$ ч. Внутренняя температура печи $t_{\text{вн}} = 320$ $^{\circ}\text{C}$. Температура окружающего воздуха $t_{\text{нар}} = 20$ $^{\circ}\text{C}$. Тепловая изоляция состоит из слоев: шамотовая кладка толщиной $\delta_{\text{ш}} = 65$ мм; вермикулитовая кладка толщиной $\delta_{\text{в}} = 250$ мм.

Определите мощность, необходимую для нагрева; КПД горячей печи; температуру наружной стенки печи (она должна быть в пределах 40–60 $^{\circ}\text{C}$); температуру между слоями изоляции.

Решение: Определяется масса деталей:

$$m_{\text{д}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \gamma \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 0,26 \cdot 7150 \cdot 9 = 131,338 \text{ кг}$$

где γ – плотность цинка, равная 7 150 кг/м³.

Полезное количество теплоты для нагрева деталей составит:

$$Q_{\text{пол}} = c \cdot m_{\text{д}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = 0,384 - 131,338 \cdot (320 - 20) = 15130 \text{ кДж}$$

где c – удельная теплоемкость цинка, равная $0,384$ кДж/(кг·°С).

Полезная мощность печи равна:

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{\tau \cdot 3600} = \frac{15130}{1,5 \cdot 3600} = 2,8 \text{ кВт}$$

План печи представлен в двух проекциях на рисунке 1.5.

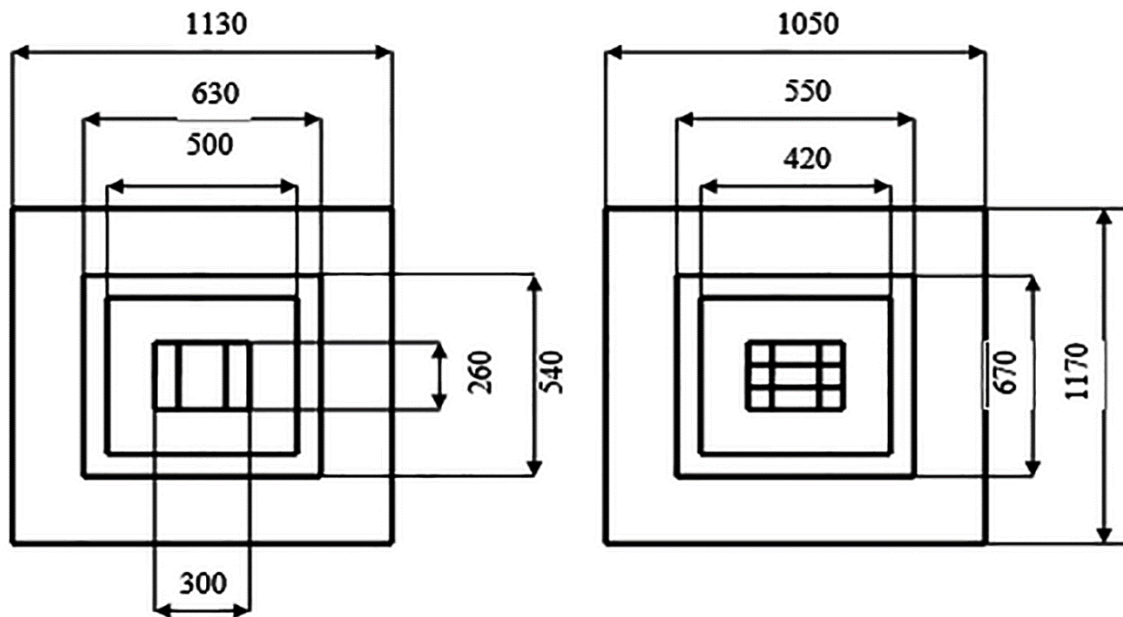


Рисунок 1.5 – Проекция электрической печи

Внутренние габариты печи (длина × ширина × высота) составляют $500 \times 540 \times 420$ мм; габариты шамотовой кладки – $630 \times 670 \times 550$ мм; наружные габариты печи – $1\,130 \times 1\,170 \times 1\,050$ мм.

Площадь внутренней поверхности печи равна:

$$F_1 = (0,5 \cdot 0,54 + 0,5 \cdot 0,42 + 0,54 \cdot 0,42) \cdot 2 = 1,41 \text{ м}^2$$

Площадь поверхности шамотовой кладки равна:

$$F_2 = (0,63 \cdot 0,67 + 0,63 \cdot 0,55 + 0,67 \cdot 0,55) \cdot 2 = 2,273 \text{ м}^2$$

Площадь наружной поверхности печи равна:

$$F_3 = (1,13 \cdot 1,17 + 1,13 \cdot 1,05 + 1,17 \cdot 1,05) \cdot 2 = 3,736 \text{ м}^2$$

Средняя площадь поверхности шамотовой кладки составит:

$$F_{\text{ш}} = \sqrt{F_1 \cdot F_2} = \sqrt{1,41 \cdot 2,27} = 1,79 \text{ м}^2$$

Средняя площадь поверхности вермикулита составит:

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

$$F_B = \sqrt{F_2 \cdot F_3} = \sqrt{2,27 \cdot 3,74} = 2,91 \text{ м}^2$$

Масса шамотовой кладки равна:

$$m_{\text{ш}} = \gamma_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ш}} \cdot \delta_{\text{ш}} = 2580 \cdot 1,79 \cdot 0,065 = 300 \text{ кг}$$

где $\gamma_{\text{ш}}$ – плотность шамота, равная 2 580 кг/м³ (приложение А).

Масса вермикулитовой засыпки равна:

$$m_B = \gamma_B \cdot F_B \cdot \delta_B = 250 \cdot 2,91 \cdot 0,25 = 182 \text{ кг}$$

где γ_B – плотность вермикулита, равная 250 кг/м³ (приложение А).

Масса контейнера составляет 25 % от массы деталей:

$$m_K = 0,25 \cdot 131,338 = 33 \text{ кг}$$

Мощность тепловых потерь печи определяется следующим образом:

$$P_{\text{пот}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_3} + \frac{\delta_B}{\lambda_B \cdot F_B} + \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ш}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \cdot F_1}}$$
$$\frac{320 - 20}{\frac{1}{12 \cdot 3,74} + \frac{0,25}{0,15 \cdot 2,91} + \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,79}} = 481 \text{ Вт}$$

где $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки в окружающую среду; при заданной температуре наружной стены 40–60 °С, его значение составляет 12 Вт/(м²·°С); $\lambda_B, \lambda_{\text{ш}}$ – теплопроводности соответственно вермикулита и шамота, равные 0,15 и 1,25 Вт/(м·°С) (приложение А).

Мощность печи для нагрева деталей в стационарном режиме составит:

$$P = P_{\text{пол}} + P_{\text{пот}} = 2,8 + 0,481 = 3,281 \text{ кВт}$$

Температура между слоями изоляции (°С) составит:

$$t_{\text{сл}} = t_{\text{вн}} - P_{\text{пот}} \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ш}}} = 320 - 481 \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,79} = 306$$

Допустимая температура нагрева вермикулита равна 1 000 °С, следовательно, вермикулитовая засыпка выдержит эту температуру.

Температура наружной стенки печи (°С) составит:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{нар}} + \frac{P_{\text{пот}}}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_3} = 20 + \frac{481}{12 \cdot 3,74} = 40,7$$

Это удовлетворяет заданному режиму температуры (40–60 °С).

Средняя температура шамотовой кладки (°С) равна:

$$t_{\text{ш}} = \frac{t_{\text{вн}} + t_{\text{сл}}}{2} = \frac{320 + 306}{2} = 313$$

Средняя температура вермикулита (°С) составит:

$$t_{\text{в}} = \frac{t_{\text{ст}} + t_{\text{сл}}}{2} = \frac{40,7 + 306}{2} = 168$$

Количество тепла для нагрева шамота равно:

$$Q_{\text{ш}} = c_{\text{ш}} \cdot m_{\text{ш}} \cdot (t_{\text{ш}} - t_{\text{нар}}) = 0,92 \cdot 300 \cdot (313 - 20) = 80868 \text{ кДж}$$

где $c_{\text{ш}}$ – удельная теплоемкость шамота, равная 0,92 кДж/(кг·°С).

Количества тепла, необходимое для нагрева вермикулита составит:

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{нар}}) = 0,63 \cdot 182 \cdot (168 - 20) = 16970 \text{ кДж}$$

Количество тепла, необходимое для нагрева стального контейнера равно:

$$Q_{\text{к}} = c_{\text{ст}} \cdot m_{\text{к}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = 0,482 \cdot 33 \cdot (320 - 20) = 4772 \text{ кДж}$$

Тогда количество тепла для нагрева всей конструкции составит:

$$\sum Q_{\text{констр}} = Q_{\text{ш}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}} = 80868 + 16970 + 4772 = 102610 \text{ кДж}$$

Продолжительность разогрева печи составит:

$$\tau = \frac{\sum Q_{\text{констр}}}{3600 \cdot \left(P - \frac{P_{\text{пот}}}{2}\right)} = \frac{102610}{3600 \cdot \left(3,281 - \frac{0,481}{2}\right)} = 9,4 \text{ час.}$$

Тепловой КПД печи равен:

$$\eta_{\text{T}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + P_{\text{пот}}} = \frac{2,8}{2,8 + 0,481} = 0,85$$

Проанализируем результат с точки зрения сменности работы установки.

При односменной работе такое время нагрева прогреть вполне допустимо.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите полезную мощность ЭТУ периодического действия для нагрева воды по заданным параметрам нагрева: $m = 100$ кг – масса нагреваемой воды; $t_1 = 5$ °С – начальная температура воды; $t_2 = 95$ °С – конечная температура воды; $\tau = 0,5$ ч – время нагрева.

2. Определите полезную мощность электрокалорифера для подогрева поступающего снаружи воздуха с температурой $t_{нар} =$ минус 40 °С внутрь животноводческого помещения с тем, чтобы воздух подогревался в нем до температуры $t_{вн} = 10$ °С, если подача вентилятора равна $L = 500$ м³/ч; удельная массовая теплоемкость воздуха $c_v = 1$ кДж/(кг·°С).

3. Определите полезную мощность электродного парового котла с требуемой производительностью $m' = 50$ кг/ч, если поступающая в котел вода имеет температуру $t_1 = 30$ °С, а пар выходит из него с температурой $t_2 = 140$ °С. Удельная теплота парообразования $a = 2\,750$ кДж/кг, удельная теплоемкость пара при температуре $t = 110$ °С: $c_n = 2,075$ кДж/(кг·°С); при температуре $t = 150$ °С: $c_n = 2,405$ кДж/(кг·°С). Для заданного значения температуры пара c_n определите интерполяцией.

4. Определите полезную мощность ЭТУ для плавки олова массой, равной $m = 10$ кг, если олово поступает в установку при температуре $t_1 = 7$ °С, а после расплавления нагревается до температуры $t_2 = 260$ °С. Время нагрева и расплавления $\tau = 110$ мин. Температура плавления олова составляет $t_{пл} = 232$ °С; удельная теплоемкость твердого олова $c_m = 0,65$ кДж/(кг·°С); удельная теплоемкость жидкого олова $c_{жс} = 0,57$ кДж/(кг·°С); удельная теплота плавления равна $a_{пл} = 207$ кДж/кг.

5. Определите полезную мощность ЭТУ, предназначенной для тепловой подготовки двигателя внутреннего сгорания (ДВС) перед пуском в зимнее время. Осуществляется подогрев ДВС от температуры окружающей среды,

равной $t_o =$ минус $50\text{ }^\circ\text{C}$ до температуры пуска $t_n = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Среднюю удельную теплоемкость ДВС принять равной $c = 0,55\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$. Время тепловой подготовки $\tau = 4\text{ ч}$. Масса ДВС $m = 4\text{ кг}$.

6. Определите полезную мощность ЭТУ для получения витаминной травяной муки с производительностью $m' = 100\text{ кг}/\text{ч}$ по сухой муке относительной влажностью $\varphi_k = 10\text{ \%}$, если известна начальная влажность поступающей травы $\varphi_n = 25\text{ \%}$ и температура $t_{нач} = 10\text{ }^\circ\text{C}$, а также температура выходящей травяной муки $t_{кон} = 85\text{ }^\circ\text{C}$. Удельная массовая теплоемкость сухого вещества травяной муки составляет $c_c = 1,2\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$. Удельная теплота парообразования $a = 2\,760\text{ кДж}/\text{кг}$.

7. Определите полезную мощность подогревателей воздуха для активного вентилирования зерна, если подача вентилятора $L = 7\,000\text{ м}^3/\text{ч}$, температура наружного воздуха $t_o = 12\text{ }^\circ\text{C}$ и его относительная влажность $\varphi_o = 85\text{ \%}$; температура воздуха, подаваемого в зерно, выше температуры наружного воздуха на $\Delta t = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Как изменится относительная влажность воздуха? Удельная массовая теплоемкость воздуха составляет $c_a = 1\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; плотность воздуха при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ равна $\gamma_{20} = 1,29\text{ кг}/\text{м}^3$.

8. Определите тепловые потери через стенки электрической печи, если стенка состоит из огнеупорного кирпича толщиной $\delta_1 = 100\text{ мм}$, шлаковаты толщиной $\delta_2 = 200\text{ мм}$, стального листа толщиной $\delta_3 = 3\text{ мм}$, имеющих соответственно теплопроводности λ_1, λ_2 и λ_3 , равные $0,685; 0,73$ и $43\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Температура наружного воздуха $t_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$, температура внутри печи $t_{вн} = 400\text{ }^\circ\text{C}$. Площадь поверхности теплопередачи $F = 4\text{ м}^2$. Коэффициент теплоотдачи для внутренней поверхности печи $\alpha_{вн}$ и для наружной поверхности печи $\alpha_{нар}$ составляет соответственно 48 и $16\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$. Определите температуры на границах слоев стенки и на ее наружной поверхности. При расчете считать площадь теплоотдачи для всех слоев одинаковой и равной F .

9. Найдите необходимую толщину теплоизоляции электротепловой установки, чтобы температура ее стенок снаружи превышала температуру окружающей среды на $\Delta t = 50$ °С. Материал тепловой изоляции – стекловата с удельной теплоемкостью $\lambda = 0,05$ Вт/(м·°С). Температура внутри ЭТУ $t_{вн} = 380$ °С. Коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей установки составляют $\alpha_{вн} = 75$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_{нар} = 17$ Вт/(м²·°С). Площадь теплоотдачи внутренней поверхности равна наружной: $F = 2$ м². Температура окружающей среды составляет $t_0 = 20$ °С.

10. Определите температуру жилы нагревательного кабеля (провода), если известна мощность, выделяющаяся в нагревателе на один метр длины провода, $P_{ног} = 15$ Вт/м, диаметр жилы провода $d = 1,1$ мм, толщина изоляционной оболочки $\delta_{из} = 2$ мм; толщина защитной оболочки $\delta_{зо} = 0,5$ мм. Теплопроводности оболочек составляют $\lambda_{из} = 0,16$ Вт/(м·°С) и $\lambda_{зо} = 43$ Вт/(м·°С). Провод подвешен горизонтально в воздухе при температуре $t_0 = 15$ °С. Коэффициент теплоотдачи в воздух равен $\alpha_{нар} = 17$ Вт/(м²·°С).

11. Определите температуру поверхности жилы нагревательного провода, заложенного в бетон электрообогреваемого пола с шагом укладки $h = 4$ см на глубину $a = 3$ см, если известна удельная погонная мощность, выделяющаяся на один метр длины провода $P_{ног} = 9$ Вт/м. Температура поверхности пола составляет $t_n = 24$ °С. Коэффициенты теплопроводности изоляции провода и бетона равны соответственно $\lambda_{из} = 0,15$ Вт/(м·°С) и $\lambda_{бет} = 1,4$ Вт/(м·°С).

12. Определите тепловые потери и температуру внутри ЭТУ, если известны данные: температура на наружной поверхности установки $t_{нов} = 30$ °С; температура окружающего воздуха $t_0 = 15$ °С; площадь поверхности теплоотдачи $F = 4$ м²; толщина теплоизоляции $\delta_{из} = 7$ см; теплопроводность теплоизоляции $\lambda_{из} = 0,07$ Вт/(м·°С); коэффициент теплоотдачи для внутренней поверхности ЭТУ $\alpha_{вн} = 40$ Вт/(м²·°С); коэффициент теплоотдачи для наружной поверхности ЭТУ $\alpha_{нар} = 15$ Вт/(м²·°С).

13. Найдите необходимую толщину тепловой изоляции теплотрассы, чтобы потери теплоты на один погонный метр ее длины не превышали уровень $\Delta P_{\text{пот}} = 100$ Вт/м. Материал изоляции – стекловата, шлаковата, асбестовое волокно с коэффициентами теплопроводности $\lambda_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{шл}}$, $\lambda_{\text{ас}}$, составляющими соответственно 0,0372; 0,73; 0,053 Вт/(м·°С). Теплотрасса представляет собой металлическую трубу диаметром $d = 0,5$ м, которая защищена от окружающей среды слоем тепловой изоляции и кожухом из оцинкованной жести. Общий коэффициент теплопроводности равен $\lambda_{\text{шл}} = 0,037$ Вт/(м·°С). Термическим сопротивлением конвекции на внутренней и наружной поверхностях пренебречь. Температура горячей воды в теплотрассе $t_{\text{гор}} = 95$ °С; температура поверхности кожуха $t_{\text{нов}} = 15$ °С.

14. Определите тепловые потери электротермической установки, предназначенной для нормализации стальных дверей. ЭТУ представляет собой вертикальную цилиндрическую печь с трехслойной стенкой. Внутренний диаметр печи $d = 0,4$ м; слой огнеупорного кирпича толщиной $\delta_1 = 200$ мм; слой тепловой изоляции $\delta_2 = 150$ мм; стальная наружная оболочка толщиной $\delta_3 = 3$ мм. Температура внутренней поверхности печи $t_{\text{вн}} = 750$ °С. Температура наружной поверхности $t_{\text{нар}} = 30$ °С. Высота печи $h = 1$ м. Потерями через торцевые поверхности пренебречь. Тепловая изоляция из шлаковаты. Значения λ_1 ; λ_2 ; λ_3 принять из приложения А.

15. Определите потребляемую мощность и КПД нагревателей для подогрева воды массой $m = 100$ кг в цилиндрической емкости с диаметром, составляющим $d = 40$ см, равным высоте h , за время $\tau = 2,5$ ч и $0,5\tau$, при условии, что стенка бака выполнена из двух слоев стали и слоя $\delta_{\text{из}}$ теплоизоляции (шлаковата) с теплопроводностью $\lambda_{\text{шл}} = 0,73$ Вт/(м·°С). Термическим сопротивлением стали пренебречь. Удельная теплоотдача для внутренней и для наружной поверхностей $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{нар}}$ составляет соответственно по 50 Вт/(м²·°С). Объем бака

1 Определение мощности электротермических установок различного назначения и алгоритма работы

V_6 , м³ на 20 % превышает объем нагреваемой воды $V_в$, м³. Массой бака пренебречь. Температура наружной поверхности $t_0 = 10$ °С; начальная температура воды $t_{нач} = 4$ °С; конечная температура нагрева $t_{кон} = 75$ °С.

16. ЭТУ имеет форму куба со стороной a , м. Некоторое количество материала $m_1 = 500$ кг с удельной массовой теплоемкостью $c_1 = 1,6$ кДж/(кг·°С) нагревается в электротермической установке, которая имеет общую массу, составляющую $m_2 = 70$ кг и среднюю удельную массовую теплоемкость, равную $c_2 = 1,5$ кДж/(кг·°С). Площадь поверхности теплоотдачи F , м² определится, исходя из объема нагреваемого материала (с учетом формы установки). Заданная температура перегрева составляет $\Delta t_3 = 100$ °С; удельная теплоотдача ЭТУ равна $\alpha = 10$ Вт/(м²·°С). Определите средний КПД (интегральный) для мощностей нагрева P_1 ; $2P_1$; $3P_1$ при температуре окружающей среды $t_0 = 0$ °С за время нагрева до заданной температуры. Полезной считать только энергию, пошедшую на нагрев материала, имеющего плотность $\gamma_1 = 2\,700$ кг/м³.

17. Определите установленную мощность ЭТУ для пастеризации молока производительностью $m' = 150$ кг/ч, если известны следующие данные: коэффициент регенерации теплоты в пастеризаторе $K_p = 0,4$; удельная теплоемкость молока $c_m = 4\,000$ кДж/(кг·°С); начальная температура молока $t_1 = 10$ °С; конечная температура молока $t_2 = 95$ °С; КПД нагревателей $\eta = 0,92$.

18. Определите полезное количество теплоты и время разогрева электрообогреваемой полосы пола размерами: ширина $B = 0,6$ м; длина $L = 15$ м; толщина $h = 0,08$ м. Полоса асфальтная с удельной массовой теплоемкостью, составляющей $c = 1,673$ кДж/(кг·°С). Потери в грунт равны 35 % от потерь в воздух. Удельная теплоотдача поверхности полосы $\alpha = 10$ Вт/(м²·°С). Начальная температура пола $t_1 = 15$ °С равна температуре окружающей среды t_0 . Конечная температура нагрева полосы составляет $t_2 = 34$ °С. Плотность асфальтной полосы $\gamma = 2\,120$ кг/м³. Установленная мощность нагревателей $P_{уст} = 12$ кВт.

Также определите КПД нагрева и температуру пола после отключения через время, составляющее $\tau_{откл} = 4$ ч.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой уравнение теплового баланса процесса нагрева?
2. От чего зависит электрический КПД ЭТУ?
3. В чем заключается физический смысл постоянной времени нагрева?
4. От каких факторов зависит термический КПД ЭТУ?
5. Какие существуют способы теплопередачи?
6. В каких ЭТУ не требуется тепловая изоляция?
7. Как зависит удельное сопротивление проводников первого и второго рода от температуры нагрева?
8. Как классифицируются электротермические установки по способу преобразования электрической энергии в тепловую?
9. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
10. Дайте понятие установившейся температуры ЭТУ.
11. Какие задачи ставятся при выполнении электрического и теплового расчетов нагревательных установок?

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ

Электроотопительные установки в сельскохозяйственных помещениях применяются для поддержания оптимальных параметров микроклимата.

Системы обогрева подразделяются на:

1) *система общего обогрева* (для создания равномерного температурного фона по всему объему помещения);

2) *система местного обогрева* (для создания зон с повышенной температурой относительно общего фона в месте нахождения молодняка или больных (ослабленных) животных);

3) *система комбинированного обогрева*, которая совмещает в себе системы общего и местного обогрева, что позволяет значительно снизить мощность установок общего обогрева.

Оптимальные параметры и требования микроклимата животноводческих помещений определяются зоотехническими нормами и требованиями.

Параметры микроклимата включают *температуру; влажность; подвижность среды; содержание в воздухе углекислоты, аммиака, микроорганизмов.*

Мощность общего отопления определяется на основе уравнения теплового баланса животноводческих помещений.

2.1 Определение мощности электрокалориферной установки

Теплопроизводительность электрокалорифера для отопительной системы животноводческого помещения определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{от} = Q_{огр} + Q_{в} + Q_{исп} + Q_{инф} - Q_{ж} - Q_{эу} \quad (2.1)$$

где $Q_{огр}$ – потери теплоты через ограждающие конструкции здания, кДж/ч;

$Q_{в}$ – потери теплоты с удаляемым воздухом (на вентиляцию), кДж/ч;

$Q_{\text{исп}}$ – потери теплоты на испарение влаги, кДж/ч;
 $Q_{\text{инф}}$ – потери теплоты на инфильтрацию, кДж/ч;
 $Q_{\text{ж}}$ – поток теплоты, выделяемый животными, кДж/ч;
 $Q_{\text{эу}}$ – тепловыделения работающих в помещении электроустановок (электропривод, освещение, установки местного обогрева), кДж/ч.

Потери теплоты через ограждения составят:

$$Q_{\text{огр}} = q_0 \cdot V \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \quad (2.2)$$

где q_0 – удельная тепловая характеристика помещения, кДж/(м³·°С·ч);
 V – объем помещения, м³;
 $t_{\text{вн}}$ – оптимальная температура воздуха внутри помещения, °С;
 $t_{\text{нар}}$ – самая низкая температура воздуха, зафиксированная для данного региона, °С.

Современная классификация помещений по тепловой характеристике выглядит следующим образом:

- 1) неутепленные помещения: $q_0 = 2,93$ кДж/(м³·°С·ч) и более;
- 2) утепленные помещения: $q_0 = 2,1-2,93$ кДж/(м³·°С·ч);
- 3) для современных животноводческих построек удельная тепловая характеристика находится в пределах $2,1-5,03$ кДж/(м³·°С·ч).

Оптимальная температура внутри помещения оговаривается зоотехническими нормами и требованиями (приложение В).

Объем помещения может быть определен как на основе типового проекта животноводческого помещения, так и с учетом норм минимального объема воздуха внутри помещения на одну голову. Объем помещения находится по количеству животных (птицы) и удельному объему, приходящемуся на одну голову, с использованием формулы (2.3):

$$V = V_{\text{уд}} \cdot N \quad (2.3)$$

где $V_{\text{уд}}$ – удельный объем, то есть объем помещения, приходящийся на одну голову, м³/гол. (приложение Г);

N – численность животных (птицы) в отапливаемом помещении, гол.

2 Определение мощности электроотопительной установки животноводческих помещений

Потери теплоты на испарение и инфильтрацию определяются приближенно в пределах 10–20 % от тепловых потерь через ограждения:

$$Q_{\text{инф}} \approx Q_{\text{исп}} \approx (0,1 \dots 0,2) \cdot Q_{\text{огр}} \quad (2.4)$$

Потери теплоты с вентилируемым воздухом находят по формуле (2.5):

$$Q_{\text{в}} = L \cdot \gamma \cdot c \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \quad (2.5)$$

где L – вентиляционная норма помещения, м³/ч;

γ – плотность наружного воздуха, кг/м³;

c – удельная массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C).

При этом плотность воздуха при любой температуре определяется:

$$\gamma = \gamma_{20} \cdot (1 + \alpha_t \cdot (t - 20)) \quad (2.6)$$

где γ_{20} – плотность воздуха при температуре 20 °C, кг/м³ (равна 1,29 кг/м³);

α_t – температурный коэффициент, °C⁻¹ (равен 1/273 °C⁻¹).

Вентиляционная норма помещения (объем вентилируемого за один час воздуха) должна обеспечивать удаление всех вредных примесей из воздуха (углекислый газ, влагу и т. д.) в такой степени, чтобы микроклимат внутри помещения был оптимальным (в соответствии с зоотехническими нормами и требованиями). Этому условию удовлетворяет неравенство (2.7):

$$L \geq \begin{cases} L_{H_2O}; \\ L_{CO_2}; \\ L_{min} \end{cases} \quad (2.7)$$

где L_{H_2O} – вентиляционная норма по условию удаления влаги, м³/ч;

L_{CO_2} – вентиляционная норма по условию удаления углекислоты, м³/ч;

L_{min} – минимально допустимая вентиляционная норма, определяемая зоотехническими требованиями, м³/ч.

Значение вентиляционной нормы по условию удаления влаги определяется по формуле (2.8):

$$L_{H_2O} = \frac{1,14 \cdot W}{d_2 - d_1}, \quad (2.8)$$

$$W = w \cdot N, \quad (2.9)$$

$$d_1 = d_{1H} \cdot \varphi_{вн}, \quad (2.10)$$

$$d_2 = d_{2H} \cdot \varphi_{нар}, \quad (2.11)$$

где W – выделения влаги всех животных, г/ч;

w – удельные выделения влаги животных, г/(ч·гол) (приложение Д);

N – число животных в помещении, гол;

d_1 – влагосодержание воздуха внутри помещения для заданных параметров внутренней температуры и влажности, г/м³;

d_{1H} – влагосодержание насыщенного пара воздуха при внутренней температуре (по диаграмме $i - d$), г/м³;

$\varphi_{вн}$ – относительная влажность воздуха внутри помещения %;

d_2 – влагосодержание наружного воздуха при заданных параметрах наружной температуры и влажности, г/м³;

d_{2H} – влагосодержание насыщенного пара воздуха при наружной температуре (по диаграмме $i - d$), г/м³.

Значение вентиляционной нормы по условию удаления углекислоты определяется по формуле (2.12):

$$L_{CO_2} = \frac{1,2 \cdot K_{CO_2}}{c_1 - c_2}, \quad (2.12)$$

$$K_{CO_2} = k \cdot N \quad (2.13)$$

где K_{CO_2} – количество углекислоты, выделяемой животными в помещении, л/ч;

k – выделение углекислоты одним животным, л/(ч·гол) (приложение Д);

c_1 – допустимое содержание углекислоты в воздухе помещения, л/м³ (обычно принимается равным 0,25 %, что соответствует значению 2,5 л/м³);

c_2 – содержание углекислоты в наружном воздухе, л/м³ (принимается равным 0,3–0,4 л/м³).

Минимально допустимый воздухообмен зависит от вида и массы животных и определяется по формуле (2.14):

$$L_{min} = \frac{l \cdot m \cdot N}{100} \quad (2.14)$$

где l – минимально допустимый воздухообмен на 100 кг живого веса животного, м³/ч (приложение В);

m – масса одного животного, кг;

N – число животных в помещении, гол.

После определения значения вентиляционной нормы помещения определяется кратность воздухообмена:

2 Определение мощности электроотопительной установки животноводческих помещений

$$K_0 = \frac{L}{V} \quad (2.15)$$

где V – объем помещения, м³.

Кратность воздухообмена показывает, сколько раз в течение часа происходит полная смена воздуха в помещении. Допустимая кратность воздухообмена в животноводческих помещениях, при которой целесообразно применение принудительной вентиляции, составляет 4–15 ч⁻¹. При меньших значениях величины достаточно естественной вентиляции. При превышении верхней границы кратности воздухообмена необходимо уменьшить вентиляционную норму помещения.

Выделение теплоты животными зависит от вида и возраста животных, температуры воздуха внутри помещения и относительной влажности, и определяется выражением (2.16):

$$Q_{\text{ж}} = q_{\text{уд}} \cdot N \cdot K_{\varphi} \cdot K_t \quad (2.16)$$

где $q_{\text{уд}}$ – удельные тепловыделения животных (поток свободной теплоты) при стандартных условиях, кДж/(ч·гол) (приложение Д);

K_{φ} и K_t – коэффициенты, учитывающие влияние влажности и температуры воздуха внутри помещения на тепловыделения животных (приложение Е).

Выделение теплоты работающими в помещении электрическими установками находят по формуле (2.17):

$$Q_{\text{эу}} = Q_{\text{эд}} + Q_{\text{эо}} + Q_{\text{мо}} \quad (2.17)$$

где $Q_{\text{эд}}$ – тепловой поток, выделяемый электрическими двигателями (в соответствии с технологией сельскохозяйственного производства технологические мероприятия в помещениях для содержания животных производятся 2–3 раза в сутки в течение короткого времени; поэтому продолжительность работы электрических двигателей, а, следовательно, и тепловой поток от них, незначителен и следует учитывать только работающие круглосуточно электрические двигатели, например, привод вентиляторов вытяжной вентиляции), кДж/ч;

$Q_{\text{эо}}$ – тепловой поток, выделяемый источниками света (следует учитывать только источники, работающие круглосуточно, например, лампы дежурного освещения), кДж/ч;

$Q_{\text{мо}}$ – поток теплоты от средств местного обогрева, кДж/ч.

Тепловой поток, выделяемый электрическими двигателями, составит:

$$Q_{эд} = P \cdot 3600 \quad (2.18)$$

где P – суммарная мощность электродвигателей, кВт.

Мощность одного электродвигателя вентилятора можно принять равной 0,75 или 1,1 кВт. Количество электродвигателей определяется типовыми проектами животноводческих помещений в зависимости от поголовья.

При определении потока теплоты от источников света следует учитывать только источники, работающие круглосуточно, например, лампы дежурного освещения:

$$Q_{эо} = P_{до} \cdot 3600 \quad (2.19)$$

где $P_{до}$ – суммарная мощность ламп системы дежурного освещения, кВт.

Мощность светильников дежурного освещения можно принять в пределах 10 % от мощности общего освещения, которую можно определить по удельной мощности освещения, рекомендуемой для животноводческих помещений в пределах 12–15 Вт/м².

Поток теплоты от средств местного обогрева учитывается в тех случаях, где принята система местного или комбинированного обогрева. Если оговаривается система общего обогрева, этой составляющей пренебрегают. Расчет потока теплоты от средств местного обогрева производят по формуле (2.20):

$$Q_{мо} = P_{мо} \cdot 3600, \quad (2.20)$$

$$P_{мо} = F \cdot P_{уд}, \quad (2.21)$$

$$F = f \cdot N \quad (2.22)$$

где $P_{мо}$ – мощность средств местного обогрева, кВт;

F – общая площадь обогреваемого пола, м²;

$P_{уд}$ – удельная поверхностная мощность обогрева (приложение Ж), кВт/м²;

f – норма обогреваемой площади на одно животное (приложение Ж), м²/гол;

N – число обогреваемых животных, гол. (зависит от группы животных: в помещениях для содержания молодняка обогрев ведется для 100 % поголовья; для взрослого поголовья крупного рогатого скота местный обогрев предусматривается для 10 % животных, предположительно больных маститом).

2 Определение мощности электроотопительной установки животноводческих помещений

В результате расчета уравнения теплового баланса животноводческого помещения определяется общая мощность системы отопления:

$$P_{от} = \frac{Q_{от}}{\eta_T \cdot 3600} \quad (2.23)$$

где η_T – термический КПД электроотопительной установки, зависящий от места размещения установки (при размещении непосредственно в производственном помещении равен 0,95–0,98; при передаче тепла по теплотрассе составляет 0,60–0,65; при размещении в отдельном помещении – 0,8–0,9).

Необходимо учитывать, что в животноводческих помещениях устанавливается не менее двух (для обеспечения равномерности обогрева и на случай выхода из строя одной из установок) отопительно-вентиляционных установок. Следовательно, мощность одного электрокалорифера составит:

$$P_{к1} = \frac{P_{от}}{Z} \quad (2.24)$$

где Z – количество электроотопительных установок, шт.

Выбор электрокалориферной установки производится по приложению И. Внешний вид установок типа СФОЦ представлен на рисунке 2.1.

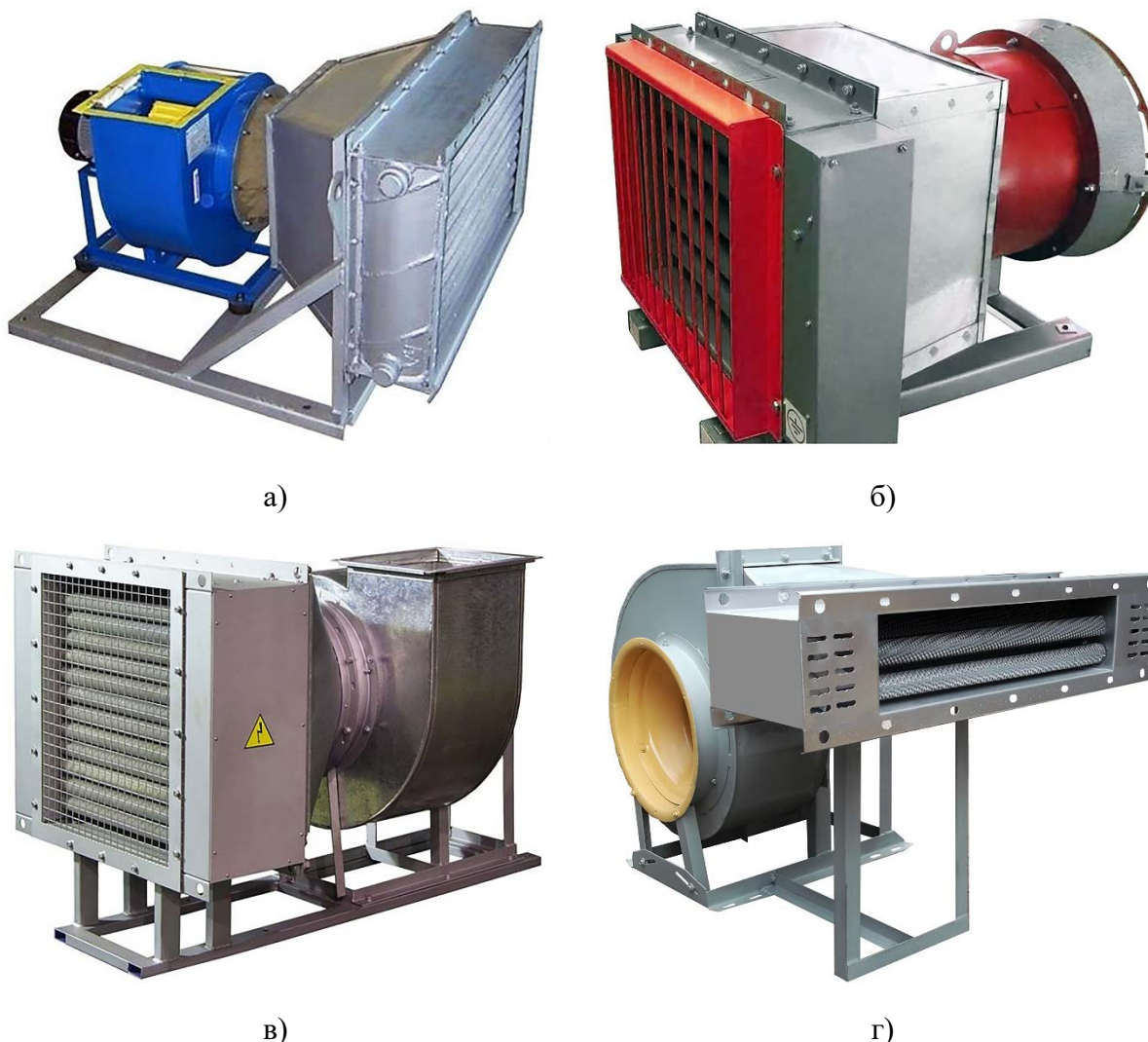
Для электроотопительной установки производится выбор электродвигателя для привода вентилятора. Требуемая подача вентилятора с учетом потерь и подсосов воздуха в воздуховодах находится по формуле (2.25):

$$L_{B1} = \frac{L}{Z} \cdot K_1 \quad (2.25)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий потери или подсос воздуха в воздуховодах (составляет 1,1 для стальных, асбоцементных и пластмассовых воздуховодов длиной до 50 м).

Для электрокалориферов, работающих в животноводческих помещениях, рекомендуется использовать центробежные вентиляторы, способные развивать высокое давление при достаточно большой подаче. Наилучшими аэродинамическими свойствами обладают вентиляторы типа Ц4-70. Зная подачу и давление, по аэродинамическим характеристикам определяют рабочую точку

выбранного вентилятора. Эта точка характеризуется КПД вентилятора и скоростью, с которой нужно вращать вентилятор, чтобы обеспечить требуемый расход и напор.



а) СФОЦ-100; б) СФОЦ-60; в) СФОЦ-40; г) СФОЦ-16
Рисунок 2.1 – Электрокалориферные установки

Мощность электродвигателя для привода вентилятора рассчитывается по формуле (2.26):

$$P_{\text{расч}} = \frac{L_{B1} \cdot H_B \cdot K_3}{10^3 \cdot \eta_B \cdot \eta_{\Pi}} \quad (2.26)$$

где L_{B1} – подача вентилятора, м³/с;

H_B – полный напор воздуха, Н/м²;

K_3 – коэффициент запаса (принимается равным 1,1–1,5);

η_B – КПД вентилятора;
 η_{II} – КПД передачи.

Вентиляторы рекомендуется комплектовать трехфазными асинхронными двигателями серий 4А, 5А, АИР.

Если скорости вращения выбранного вентилятора и электродвигателя совпадают, то применяют непосредственное соединение вала электродвигателя и вентилятора. В этом случае КПД передачи составит единицу. Если непосредственное присоединение неосуществимо, применяют клиноременную передачу, и в этом случае КПД передачи равен 0,95.

Схема управления электрокалориферной установкой. На рисунке 2.2 показана принципиальная электрическая схема электрокалориферных установок типов СФОЦ-10/0,5Т и СФОЦ-16/0,5Т, имеющих по две нагревательные секции.

Схема управления предусматривает автоматический и ручной режимы работы, что обеспечивается переключателями *SA1* и *SA2*. Автоматический режим работы осуществляется с помощью биметаллических датчиков температуры ДТКБ-53Т (*SK2* и *SK3*), устанавливаемых в помещении вдали от мест с резкими колебаниями температуры воздуха, на высоте 1–2 м от уровня пола. Защита электрокалорифера от повышения температуры свыше 180 °С на поверхности оребрения ТЭН осуществляется с помощью биметаллического датчика ТР-200 (*SK1*), установленного сверху на калорифере. В схеме предусмотрена блокировка (контакты *QF1*), не допускающая включения секций электрокалорифера *EK1* и *EK2* под напряжение при неработающем электродвигателе вентилятора *M*.

Включением рубильника *QS1* напряжение подается на цепи управления, при этом загорается сигнальная лампа *HL1*. В случае, если электрокалорифер не имеет аварийного перегрева, а контакты датчика *SK1* замкнуты, срабатывает промежуточное реле *KL1*. Оно контактами *KL1:1* отключает цепь лампы

HL4, сигнализирующей о перегреве электрокалорифера, а контактами KL1:2 подготавливает к работе цепь включения магнитных пускателей KM1 и KM2.

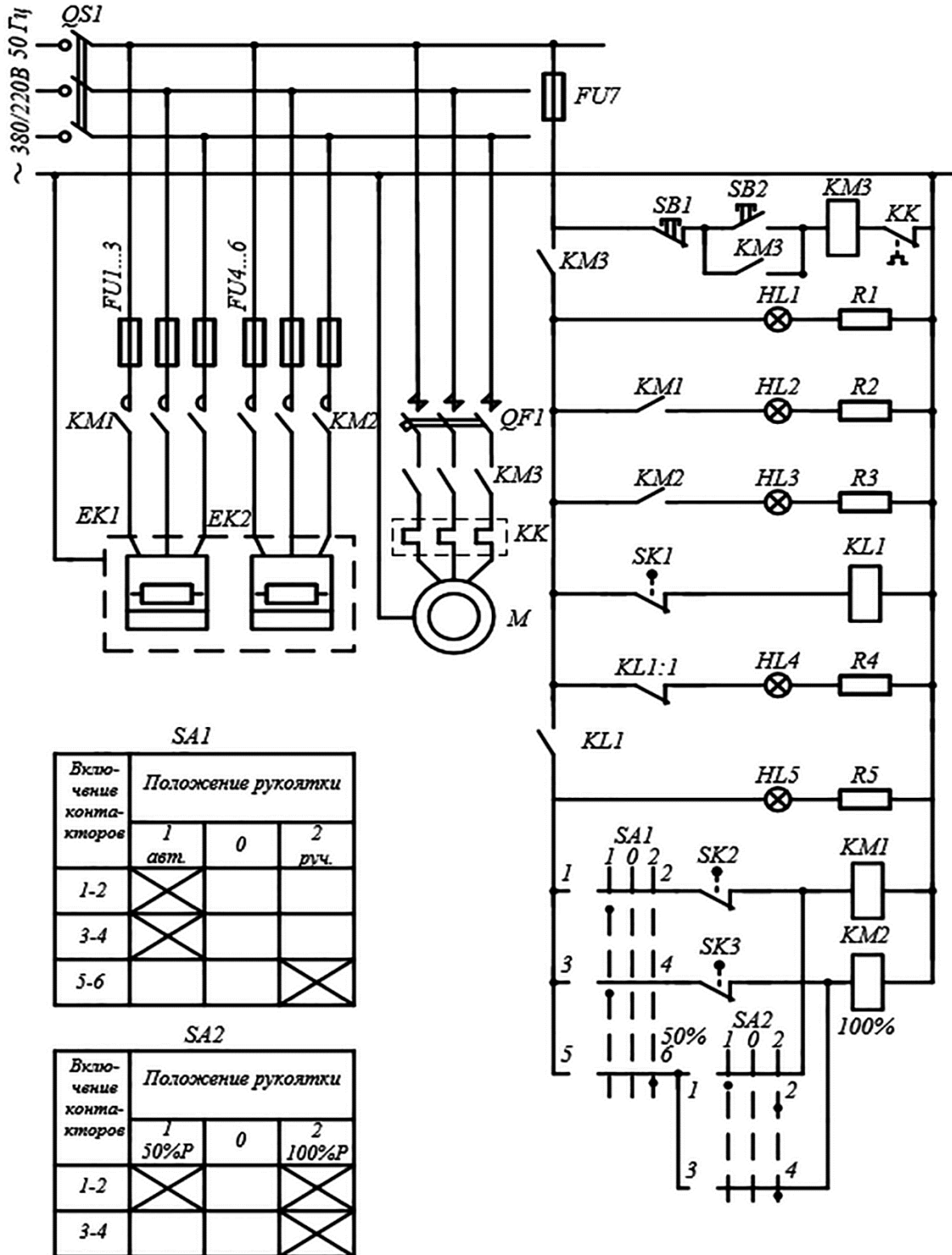


Рисунок 2.2 – Схема электрическая принципиальная управления электрокалориферной установкой

После включения автоматического выключателя *QF1* начинает работать электродвигатель вентилятора *M*, о чем с помощью блок-контакта *QF1* сигнализирует лампа *HL5*. При этом по подготовленной цепи *QF1*, *KL1:2* напряжение подается на переключатель *SA1*. При положении рукоятки переключателя *SA1* «Автоматика» через контакты датчиков *SK2* и *SK3* происходит включение магнитных пускателей *KM1* и *KM2* и секций калорифера *EK1* и *EK2*. Если рукоятка переключателя *SA1* находится в положении «Ручное», то напряжение через контакты 5–6 *SA1* поступает на переключатель *SA2*, которым можно включить один или сразу оба пускателя *KM1* и *KM2* (50 и 100 % мощности калорифера). При срабатывании пускателей *KM1* и *KM2* одновременно загораются лампы *HL2* и *HL3*, сигнализирующие о том, что напряжение на секции калориферов *EK1* и *EK2* подано.

По мере повышения температуры воздуха в помещении до значения, установленного на датчике *SK2*, контакты последнего разомкнутся и магнитный пускатель *KM1* отключится, обесточив секцию электронагревателей *EK1*. Электрокалориферная установка останется включенной на 50 % номинальной мощности.

При дальнейшем повышении температуры размыкаются контакты *SK3*, обесточивается магнитный пускатель *KM2* и отключается вторая секция электронагревателей *EK2*. При снижении температуры воздуха в отапливаемом помещении ниже заданной величины автоматически включаются секции нагревателей в обратной последовательности.

Термодатчики ДТКБ-53Т имеют уставку регулирования в пределах температуры 0–30 °С. Положение уставок терморегуляторов определяется опытным путем при настройке теплового режима электрокалориферной установки. Так, в коровниках с температурой 15 °С один из датчиков следует настроить на значение 14 °С, а другой – на 15 °С.

При многолетней эксплуатации электрокалориферных установок серии СФОЦ (и их предшественников СФОА) выяснилось, что в ряде случаев оказывается мала принятая объемная подача воздуха вентилятором установки и требуется ее изменение в процессе работы. На практике это приводило к установке дополнительного вентилятора в соответствии с требуемым расходом воздуха в помещении, который определялся кратностью воздухообмена.

Пример. Рассчитайте мощность электроотопительной установки в коровнике на $N = 100$ голов. Удельная тепловая характеристика помещения составляет $q_0 = 4$ кДж/(м³·°С·ч). Температура внутри помещения $t_{вн} = 8$ °С; температура наружного воздуха $t_{нар} =$ минус 25 °С. Кратность воздухообмена $K_o = 4$ ч⁻¹.

Решение: При отсутствии установок местного обогрева уравнение теплового баланса животноводческого помещения для определения требуемой тепловой производительности установки имеет вид:

$$Q_{от} = Q_{огр} + Q_{в} + Q_{исп} + Q_{инф} - Q_{ж}$$

Потери тепла через ограждающие поверхности составят:

$$Q_{огр} = q_0 \cdot V \cdot (t_{вн} - t_{нар})$$

$$4 \cdot 1700 \cdot (8 + (-25)) = 224400 \text{ кДж/ч}$$

Объем помещения определится через минимальный объем воздуха в помещении на одну голову; для взрослого поголовья крупного рогатого скота удельный объем равен 17 м³/гол. Тогда:

$$V = V_{уд} \cdot N = 17 \cdot 100 = 1700 \text{ м}^3$$

Потери тепла с вентилируемым воздухом составят:

$$Q_{в} = L \cdot \gamma \cdot c \cdot (t_{вн} - t_{нар}) = V \cdot K_o \cdot \gamma \cdot c \cdot (t_{вн} - t_{нар})$$

$$Q_{в} = 1700 \cdot 4 \cdot 1,12 \cdot 1 \cdot (8 - (-25)) = 251328 \text{ кДж/ч}$$

Плотность воздуха при существующей наружной температуре равна:

$$\gamma = \gamma_{20} \cdot (1 + \alpha_t \cdot (t - 20)) = 1,29 \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (-15 - 20)\right) = 1,12 \text{ кг/м}^3$$

2 Определение мощности электроотопительной установки животноводческих помещений

Потери тепла на инфильтрацию и на испарение составят:

$$Q_{\text{инф}} \approx Q_{\text{исп}} \approx (0,1 \dots 0,2) \cdot Q_{\text{огр}} = 0,1 \cdot 224400 = 22440 \text{ кДж/ч}$$

Выделение теплоты животными с учетом потока свободной теплоты:

$$Q_{\text{ж}} = q_{\text{уд}} \cdot N \cdot K_{\varphi} \cdot K_t = 2513 \cdot 100 \cdot 1,14 \cdot 0,8 = 229186 \text{ кДж/ч}$$

$$\text{при этом } q_{\text{уд}} = 698 \cdot 3,6 = 2513 \text{ кДж/ч}$$

Тогда требуемая теплопроизводительность составит:

$$Q_{\text{от}} = 224400 + 251328 + 22440 + 22440 - 229186 = 291422 \text{ кДж/ч}$$

Мощность электроотопительной установки с учетом размещения непосредственно в стойловом помещении (термический КПД равен 0,98) составит:

$$P_{\text{от}} = \frac{Q_{\text{от}}}{\eta_{\text{T}} \cdot 3600} = \frac{291422}{0,98 \cdot 3600} = 82,6 \text{ кВт}$$

В качестве отопительной установки могут быть выбраны две (для обеспечения равномерного обогрева) электрокалориферные установки СФОЦ-40 номинальной мощностью 40 кВт с центробежным вентилятором.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите установленную мощность установки местного обогрева для животноводческих помещений в соответствии с условиями, приведенными в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты задания

Номер варианта	Тип помещения	Число животных, гол.	Вид обогрева
0	коровник	400	ЭОП
1	телятник	200	комбинированный
2	свинарник-маточник	50	ИКО
3	птичник (цыплята)	5 000	ИКО
4	коровник (родительское отделение)	100	ЭОП
5	коровник	50	комбинированный
6	свинарник-откормочник	1 000	ЭОП
7	коровник	200	ИКО

Продолжение таблицы 2.1

Номер варианта	Тип помещения	Число животных, гол.	Вид обогрева
8	телятник	128	ИКО
9	свинарник-маточник	100	комбинированный
Примечания: ЭОП – электрообогреваемый пол; ИКО – инфракрасный обогрев; комбинированный – сочетание ЭОП и ИКО.			

2. Определите установленную мощность для отопления животноводческого помещения в соответствии с заданием по таблице вариантов.

Таблица 2.2 – Варианты задания

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип помещения	К	СМ	Т	К (РО)	П	К	СМ	Т	СО	К (РО)
Число животных (N), гол.	200	80	600	50	10 000	800	120	228	500	100
Кратность воздухообмена (K_0), час ⁻¹	6	8	5	10	8	7	6	4	3,5	8
Удельный объем помещения ($V_{уд}$), м ³ /гол.	14	12	10	18	0,3	15	18	8	5	20
Температура воздуха внутри помещения ($t_{вн}$), °С	12	16	18	18	24	14	18	16	12	20
Наружная температура воздуха ($t_{нар}$), °С	-16	-20	-22	-24	-26	-30	-32	-34	-36	-38
Удельная тепловая характеристика помещения (g), кДж/(м ³ ·°С·ч)	3,5	2,5	4,0	2,0	4,0	3,0	4,5	5,0	4,0	3,5
Примечания: К – коровник; СМ – свинарник-маточник; Т – телятник; К (РО) – родильное отделение коровника; П – птичник; СО – свинарник-откормочник.										

Контрольные вопросы

1. Какие составляющие входят в уравнение теплового баланса животноводческих помещений?
2. Каков физический смысл кратности воздухообмена?
3. По какому условию определяется вентиляционная норма помещения?
4. Какие составляющие и почему входят в уравнение теплового баланса со знаком «минус»?
5. Каков физический смысл удельной тепловой характеристики помещения?
6. Сформулируйте физический смысл удельной массовой теплоемкости материала.
7. Каков порядок определения мощности электроотопительной установки для животноводческого помещения?
8. По какому принципу определяется величина термического коэффициента полезного действия электроотопительной установки животноводческого помещения?
9. Для чего трубчатые электронагреватели в электрокалорифере выполняются ребренными?
10. Дайте пояснения к принципиальной электрической схеме электрокалориферной установки.

3 ЭЛЕКТРОДНЫЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Электродный нагрев применяют для нагрева электропроводящих материалов с ионной проводимостью. По принципу действия электродный нагрев относится к прямому, так как сам материал является средой, в которой происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Электроды служат только для подвода электрического тока к нагреваемому материалу. Во избежание электролиза воды, последствием которого возникает взрывоопасная смесь, в электродных установках используют только переменный ток.

Электроды изготавливают из металлических материалов: титана, нержавеющей и углеродистой стали, электротехнического графита.

По конструктивному исполнению различают три основных конфигурации электродных систем: плоская, коаксиальная, стержневая (трех- и четырехстержневая) (рис. 3.1).

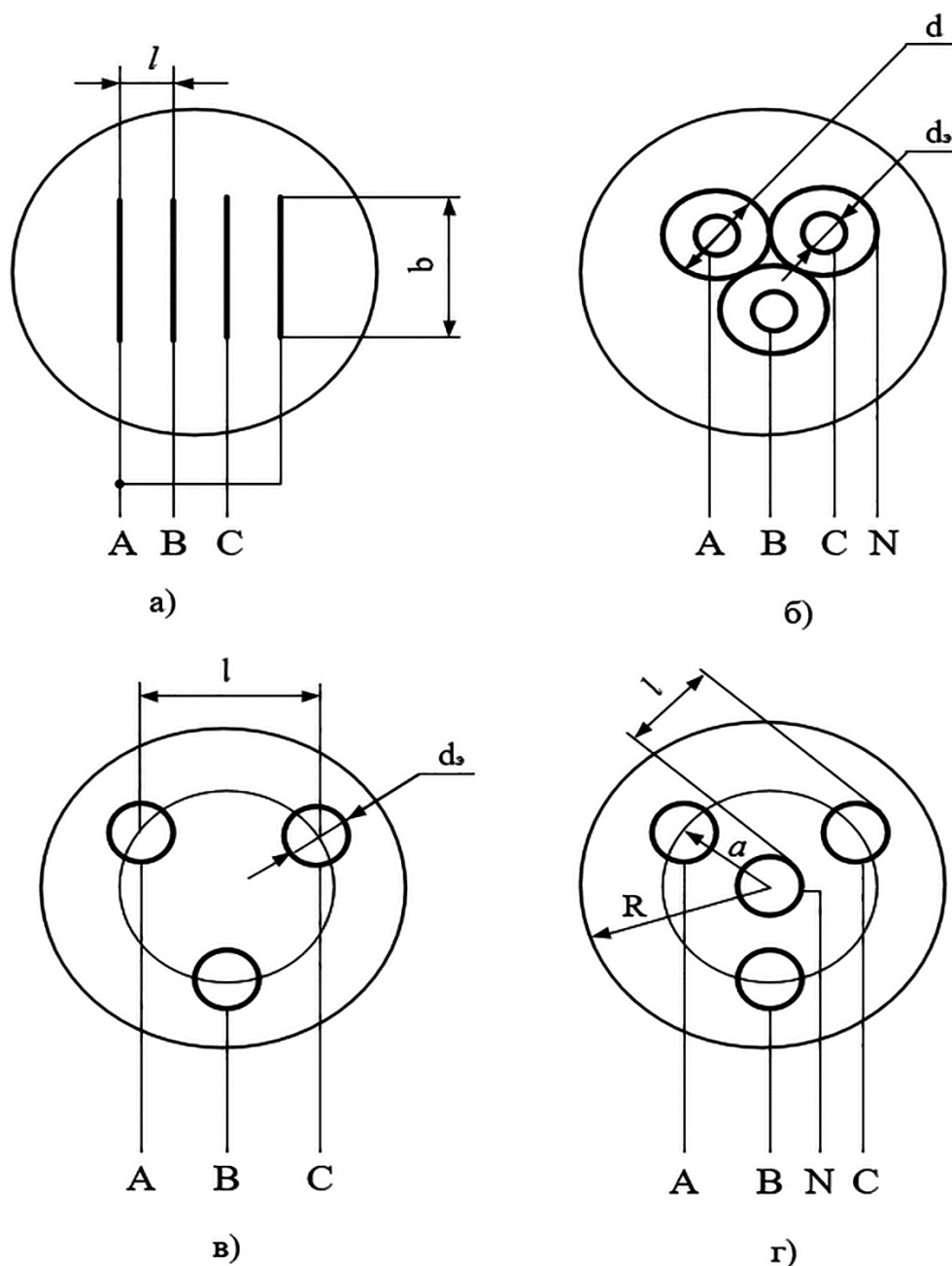
Параметры электродных систем приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры трехфазных электродных систем

Конструктивная схема	Схема замещения (схема соединения)	Допустимая плотность тока на электродах, А/м ²	Геометрический коэффициент формы электродов
Плоская	«треугольник»	5 000	$K_{\Gamma} = \frac{3 \cdot l}{b}$
Коаксиальная	«звезда»	20 000	$K_{\Gamma} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d}{d_3}$
Трехстержневая	«треугольник»	20 000	$K_{\Gamma} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{3 \cdot a^2 \cdot (R^2 - a^2)^3}{r^2 \cdot (R^6 - a^6)}$
Четырехстержневая	«звезда»	20 000	$K_{\Gamma} = \frac{1}{6 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{3 \cdot a^2 \cdot (R^2 - a^2)^3}{r^2 \cdot (R^6 - a^6)}$

При высокой плотности тока на электродах проявляется электролиз воды и при питании от сети переменного тока, поэтому существуют ограничения по

плотности тока, характеризующиеся допустимым значением. Соотношение размеров в электродной системе выражается геометрическим коэффициентом формы электродов (K_{Γ}).

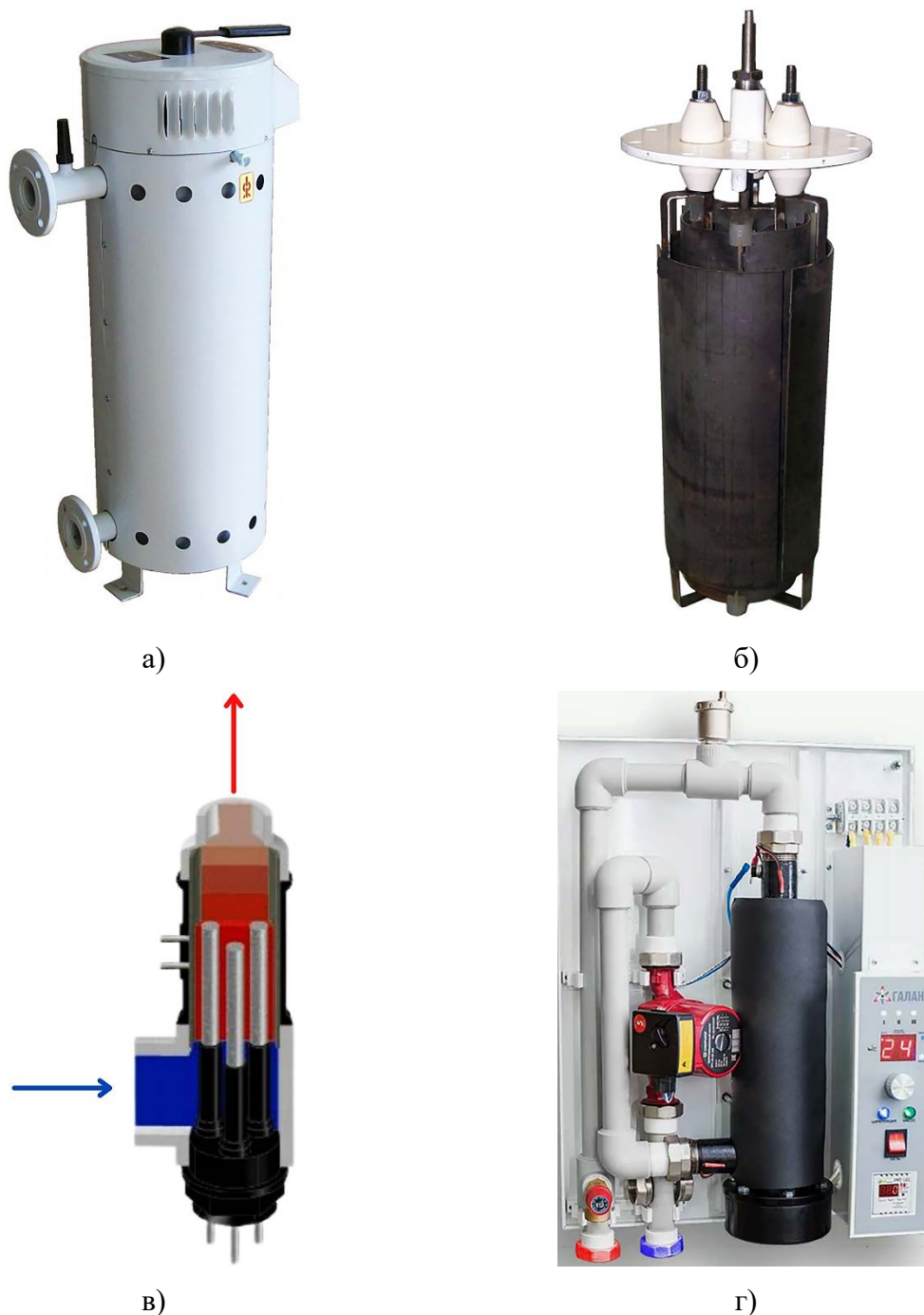


l – расстояние между электродами; $d_с$ – диаметр фазного электрода; d – диаметр нейтрального (наружного) электрода; R – радиус емкости водонагревателя; a – радиус центра электродов; b – ширина электрода

а) плоская; б) коаксиальная; в) трехстержневая; г) четырехстержневая

Рисунок 3.1 – Конструкции электродных систем

В сельскохозяйственном производстве используются проточные (быстродействующие) и непроточные (емкостные или аккумулирующие) водонагреватели (рис. 3.2).



а) ЭПЗ-100; б) электродная система ЭПЗ-100 в сборе; в) проточный Elektrodotowy heverson (12 кВ); г) электрический котел ГАЛАКС 15 с насосом (электродный)

Рисунок 3.2 – Промышленные образцы электродных водонагревателей

В проточных водонагревателях вода движется по установке непрерывно и за время прохождения нагревается от начальной до конечной, оговоренной технологическими условиями, температуры. Такого рода установки характеризуются производительностью по нагреваемому материалу или подачей (m'). В непроточных установках вода нагревается порциями за определенный промежуток каждая. Характеризуются такие установки массой нагреваемого материала (m) и временем нагрева одной порции (τ).

Аккумуляционные нагреватели воды имеют ряд преимуществ по сравнению с проточными:

1) возможность аккумуляции теплоты и способность работать в часы провалов в графиках нагрузки электрических подстанций, что обеспечивает высокие экономические показатели электрического подогрева воды;

2) благодаря большой емкости установок обеспечивается гораздо больший расход горячей воды;

3) в связи с большой длительностью нагрева происходит снижение потребляемой мощности.

Вместе с тем аккумуляционные водонагреватели имеют существенные недостатки:

1) занимают значительно большие производственные площади;

2) существенно увеличивается продолжительность нагрева;

3) при равномерной тепловой нагрузке (водяной обогрев, подогрев питьевой воды и т. д.) мощность аккумуляционной установки будет такой же, как и проточной.

Преимущества проточных установок по сравнению с аккумуляционными:

1) во много раз меньше размеры, ниже стоимость, практически не занимают производственных площадей;

2) большое быстроедействие (через несколько минут после включения температура достигает заданного значения);

3) возможность широкого изменения температуры воды путем изменения подачи (открытия вентиля на входном трубопроводе).

Недостатки проточных водонагревателей:

- 1) обычно имеют высокую установленную мощность на единицу тепла;
- 2) могут работать только по свободному графику, то есть в часы водопотребления; независимо от графика нагрузки энергосистемы, имеют низкий коэффициент использования;
- 3) не допускают перерывов в электроснабжении.

Достоинствами аккумуляционных и проточных установок обладают установки проточного типа с дополнительными баками-аккумуляторами горячей воды. Однако при этом требуются дополнительные капитальные затраты на создание бака-аккумулятора.

Паровые электродные котлы, обеспечивающие конкретный технологический процесс, как правило, бывают только установками непрерывного действия из-за невозможности аккумуляции теплоты в виде пара.

3.1 Конструктивный расчет электродного водонагревателя

В задачи расчета электродной системы входит определение объема бака, геометрических размеров электродов, межэлектродного расстояния.

Определение размеров корпуса электродного аккумуляционного водонагревателя производится, исходя из требуемого разового объема нагреваемой воды. Обычно корпус (бак) выполняется в виде цилиндра, высота которого примерно в два раза превышает диаметр, то есть:

$$H = 2 \cdot D$$

Разовый объем корпуса ($V_{\text{раз}}$) определяется объемом воды, нагреваемой за один цикл, который увеличивается на 10 %. Тогда диаметр бака составит:

$$D = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot V_{\text{раз}}}{\pi}} \quad (3.1)$$

Зная диаметр и объем бака, можно определить его высоту.

Электродная система располагается на днище бака и должна иметь габариты меньше диаметра бака с учетом минимально допустимых изоляционных расстояний (не менее 0,01 м от электрода до корпуса бака).

Для проточных установок размеры корпуса определяются размерами разработанной электродной системы и служат только для ее размещения с соблюдением допустимых минимальных расстояний между электродами и корпусом бака, определяемых формулой (3.2):

$$l_{\text{min}} = \frac{U}{j_{\text{доп}} \cdot \rho_{\text{кон}}}, \quad (3.2)$$

$$\text{где } \rho_{\text{кон}} = \frac{\rho_{20} \cdot 40}{20 + t_{\text{кон}}} \quad (3.3)$$

где U – напряжение между поверхностями электродов или электрода и корпуса, В (для коаксиальной и четырехэлектродной стержневой систем $U = U_{\text{ф}}$; для остальных – $U = U_{\text{л}}$);

$j_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока на электродах, А/м² (табл. 3.1);

$\rho_{\text{кон}}$ – значение удельного сопротивления воды при конечной температуре нагрева, Ом·м (любой водонагреватель рассчитывается с учетом возможности нагрева воды до температуры 100 °С);

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

$t_{\text{кон}}$ – конечная температура нагрева, °С.

По полученным значениям принимаются расстояния между электродами и между электродами и корпусом с учетом того, что из соображений эксплуатации принятое расстояние должно быть не менее 0,01 м, то есть:

$$l_{\text{min}} \leq l \leq 0,01 \text{ м}$$

Высота бака проточного водонагревателя принимается больше высоты электрода. Размеры электродной системы (рис. 3.1) будут зависеть от ее конфигурации.

Расстояние между электродами дает только один размер электродной системы. Базовым размером для плоской электродной системы является ширина электрода, определяемая с учетом алгоритма работы ЭТУ:

1) для установки периодического действия:

$$b = \sqrt{2 \cdot S_{min}} \quad (3.4)$$

2) для установки непрерывного действия:

$$b = \sqrt{\frac{S_{min}}{2}} \quad (3.5)$$

где S_{min} – минимально возможная площадь электрода, м².

Для коаксиальных и стержневых систем базовым размером является диаметр фазного электрода ($d_э$), при расчете которого предварительно выбирается соотношение между диаметром электрода и его высотой:

$$\text{при } \frac{h}{d_э} = 2 \rightarrow d_э = \sqrt{\frac{S_{min}}{2\pi}}$$

$$\text{при } \frac{h}{d_э} = 1 \rightarrow d_э = \sqrt{\frac{S_{min}}{\pi}}$$

Минимально возможная площадь электродов не является реальной, однако представляет собой минимальное допустимое значение и определяется исходя из допустимой плотности тока:

$$S_{min} = \frac{I_{\phi}}{j_{cp}} \cdot K_n \quad (3.6)$$

где I_{ϕ} – фазный ток электродной системы, А;

j_{cp} – средняя плотность тока на электродах, А/м²;

K_n – коэффициент неравномерности распределения плотности тока на электродах (для плоских и коаксиальных систем составляет 1,2; для стержневых – 1,5).

Фазный ток электродной системы определяется формулой (3.7):

$$I_{\phi} = \frac{P}{3 \cdot U_{\phi}} \quad (3.7)$$

где P – расчетная мощность водонагревателя, Вт (определяется в зависимости от алгоритма работы установки по выражениям (1.8), (1.9);

U_{ϕ} – фазное напряжение между электродами, В.

Средняя плотность тока на электродах рассчитывается по формуле (3.8):

$$j_{\text{ср}} = \frac{U_{\phi}}{l \cdot \rho_{\text{ср}}} \quad (3.8)$$

где l – расстояние между электродами, м;

$\rho_{\text{ср}}$ – среднее за период нагрева удельное сопротивление воды, Ом·м.

Среднее за период нагрева удельное сопротивление воды составит:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}} \cdot \ln \frac{20 + t_{\text{кон}}}{20 + t_{\text{нач}}} \quad (3.9)$$

где $t_{\text{кон}}$ – конечная температура нагрева воды, °С;

$t_{\text{нач}}$ – температура воды, поступающей в водонагреватель, °С.

На основе расчетных базовых размеров строится в масштабе электродная система заданного типа в плане (рис. 3.1).

Высота электродной системы определяется по формуле (3.10):

$$h = \frac{K_{\Gamma}}{R_{\phi}} \cdot \rho_{\text{ср}} \quad (3.10)$$

где K_{Γ} – геометрический коэффициент электродной системы;

R_{ϕ} – фазное сопротивление электродной системы, Ом.

Геометрический коэффициент электродной системы определяется по размерам электродной системы в плане (рис. 3.1) в соответствии с таблицей 3.1.

Фазное сопротивление электродной системы находят по формуле (3.11):

$$R_{\phi} = \frac{3 \cdot U^2}{P} \quad (3.11)$$

где U – напряжение между электродами, В.

Электродные паровые котлы можно рассматривать как проточные установки, работающие в режиме парообразования, и как аккумуляционные в переходных режимах с момента включения до начала парообразования. Объем корпуса парового котла должен быть таким, чтобы внутри него можно было разместить электродную систему с обеспечением необходимых изоляционных расстояний.

Для паровых котлов, работающих в режиме кипения, среднее удельное сопротивление приравнивается к удельному сопротивлению пароводяной смеси, что показывает выражение (3.12):

$$\rho_{\text{пвс}} = \rho_{t_{\text{кип}}} \cdot \alpha \cdot e^{j \cdot K}, \quad (3.12)$$

$$\text{где } \rho_{t_{\text{кип}}} = \rho_{20} \cdot \frac{40}{20 + t_{\text{кип}}} \quad (3.13)$$

где $\rho_{t_{\text{кип}}}$ – удельное сопротивление воды при температуре кипения, Ом·м;

α – коэффициент, учитывающий влияние давления в котле на интенсивность парообразования; для водонагревателей, работающих при нормальном атмосферном давлении, составляет единицу; для котлов, работающих под давлением, равен 0,925;

j – плотность тока в режиме кипения (реальная), А/м²;

K – коэффициент, учитывающий влияние плотности тока на интенсивность преобразования, м²/А; (равен $1,5 \cdot 10^{-4}$).

Плотность тока на электродах определяется по формуле (3.14):

$$j_t = \frac{U}{l \cdot \rho_t} \quad (3.14)$$

Максимальная плотность тока на электродах и в соприкасающемся с ними объеме воды ограничивается условиями недопустимости процесса электролиза, который приводит к образованию взрывоопасной смеси в водонагревателе. Предельная плотность тока, не приводящая к электролизу, зависит от конструкции электродных систем (табл. 3.1).

В установках периодического действия при неизменном напряжении на электродах плотность тока не остается постоянной в процессе нагрева. Она

возрастает из-за уменьшения удельного электрического сопротивления материала при увеличении температуры. При конечной температуре нагрева плотность тока не должна превышать допустимого значения. В установках непрерывного действия она изменяется только в первоначальный период, когда установка выходит на установившийся режим работы, то есть на стадии переходного режима.

В связи с взаимной зависимостью плотности тока на электродах и удельного сопротивления воды удельное сопротивление пароводяной смеси определяют методом постепенных приближений в несколько этапов:

$$\begin{aligned}
 1) \rho_{\text{кип}} &= \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20 + t_{\text{кип}}}; j_{\text{кип1}} = \frac{U}{l \cdot \rho_{\text{кип}}}; \rho_{\text{пвс1}} = \rho_{\text{кип}} \cdot \alpha \cdot e^{K \cdot j_{\text{кип1}}} \\
 2) j_{\text{кип2}} &= \frac{U}{l \cdot \rho_{\text{пвс1}}}; \rho_{\text{пвс2}} = \rho_{\text{кип}} \cdot \alpha \cdot e^{K \cdot j_{\text{кип2}}} \\
 3) j_{\text{кип3}} &= \frac{U}{l \cdot \rho_{\text{пвс2}}}; \rho_{\text{пвс3}} = \rho_{\text{кип}} \cdot \alpha \cdot e^{K \cdot j_{\text{кип3}}}
 \end{aligned}$$

Расчет ведется до тех пор, пока значения плотности тока ($j_{\text{кип}}$) и удельного сопротивления ($\rho_{\text{пвс}}$) на последнем этапе расчета не будут отличаться от значений предпоследнего более чем на один процент.

Полученное значение удельного сопротивления пароводяной смеси используется для расчета высоты электродной системы парового котла:

$$h = \frac{K_{\Gamma}}{R_{\Phi}} \cdot \rho_{\text{пвс}} \quad (3.15)$$

Если высота электродной системы окажется слишком большой, то электродную систему можно разделить на несколько групп аналогичных электродов, высота каждой из которых составит:

$$h_1 = \frac{h}{n_{\text{гр}}} \quad (3.16)$$

где $n_{\text{гр}}$ – число групп электродов.

Причем в этом случае общий геометрический коэффициент также изменится и составит:

$$K_{\Gamma\text{гр}} = \frac{K_{\Gamma}}{n} \quad (3.17)$$

Если высота электродной системы окажется слишком малой (для коаксиальных и стержневых систем), что возможно при малых мощностях нагрева, следует уменьшить диаметр электрода по сравнению с расчетным ориентировочно во столько раз, во сколько раз полученная высота меньше желаемой, то есть выбрать новый диаметр электрода и расчет повторить.

В качестве материалов для электродов можно использовать любые проводники. Однако следует помнить, что они должны противостоять коррозии в электрическом поле, при высокой температуре и большой влажности. При нагреве материалов, предназначенных для технических нужд, электроды изготавливают из конструкционной стали или латуни. Но при этом идет активное насыщение воды железом, что оказывает негативное влияние и на состояние трубопроводов. При нагреве продуктов, идущих на кормление или поение животных, электроды не должны образовывать токсичные оксиды. В большей мере этому требованию отвечают уголь и графит. Однако их используют редко из-за недостаточной технологичности. Более распространены электроды из нержавеющей стали, что обеспечивает удовлетворительное качество воды и значительное увеличение срока службы электродов.

3.2 Рабочие характеристики электродных водонагревателей

Рабочие характеристики отражают основные технические параметры ЭТУ в рабочих режимах. Рабочими режимами работы электродных водонагревателей являются переходный и установившийся.

Под **установившимися режимами работы установок электродного нагрева** понимают такие режимы, при которых остаются неизменными во времени: мощность нагрева (P), напряжение (U), ток (I) или плотность тока (j), а также температура (t) нагреваемой жидкости или паропроизводительность (m'_n) для парогенераторов.

Переходными режимами установок электродного нагрева называют такие режимы работы, при которых изменяются во времени одна или несколько из названных выше величин, а также, если изменяются какие-либо из этих величин в пространстве.

Исходя из приведенных формулировок, можно сделать заключение, что в установившихся режимах могут работать только установки непрерывного действия при условии постоянной подачи жидкости или расхода пара и неизменности питающего напряжения. Установки периодического действия могут работать только в переходных режимах. Установки непрерывного действия в ряде случаев также работают в переходных режимах. К ним следует отнести: пуск установки, изменение расхода жидкости или пара. Кроме того, даже в установившемся режиме работы по мере движения жидкости между электродами изменяется ее температура и плотность тока в разных точках электродной системы. Таким образом, установившийся по внешним параметрам режим работы электродного нагревателя в то же время является переходным по внутренним параметрам установки.

К **рабочим характеристикам электродных водонагревателей периодического действия (емкостных водонагревателей)** относятся:

- 1) зависимость мощности ЭТУ от температуры воды $P = f(t)$;
- 2) зависимость температуры воды от времени нагрева $t = f(\tau)$;
- 3) зависимость мощности ЭТУ от времени нагрева $P = f(\tau)$.

Статическая зависимость мощности электродного нагрева от температуры воды $P = f(t)$ аналитически описывается выражением (3.18):

$$P_t = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{R_{\phi t}}; P_t = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{R_{\phi 20}} \cdot \frac{20 + t}{40}; P_t = P_{20} \cdot \frac{20 + t}{40} \quad (3.18)$$

где P_{20} – мощность при температуре 20 °С, Вт;

$R_{\phi 20}$ – фазное сопротивление системы при температуре 20 °С, Ом.

Зависимость температуры воды при электродном нагреве от времени нагрева $t = f(\tau)$ представляет собой положительную экспоненту и имеет аналитическое выражение (3.19):

$$t = (20 + t_1) \cdot e^{\frac{\tau}{T_H}} - 20 \quad (3.19)$$

где t_1 – температура воды в момент включения, °С;

τ – время нагрева воды до заданной температуры, с;

T_H – постоянная времени электродного нагрева, с.

Зависимость мощности от времени нагрева $P = f(\tau)$ может быть получена путем совместного решения выражений (3.18) и (3.19). Она представляет собой также положительную экспоненту (3.20):

$$P = P_1 \cdot e^{\frac{\tau}{T_H}} \quad (3.20)$$

где P_1 – мощность включения, соответствующая температуре воды t_1 , Вт.

Для электродных установок периодического действия постоянная времени нагрева определяется выражением (3.21):

$$T_H = \frac{40 \cdot m \cdot c}{P_{20} \cdot \eta} \quad (3.21)$$

где m – масса воды, кг;

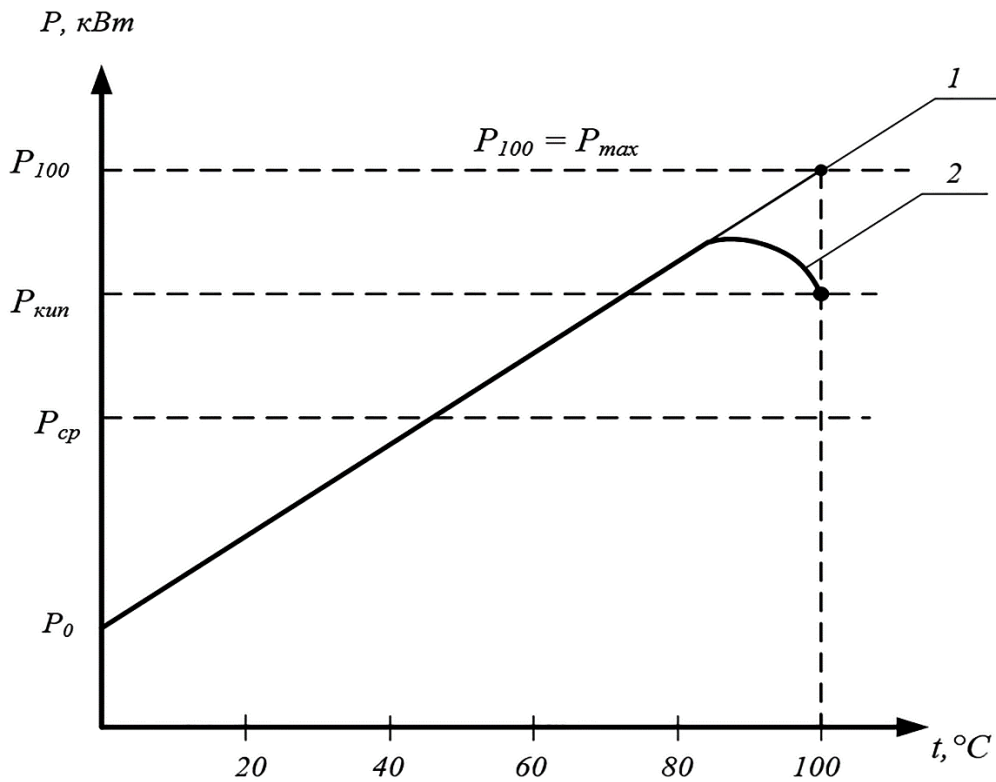
c – удельная массовая теплоемкость воды (равна 4,19 кДж/(°С·кг));

η – КПД электродного нагрева (равен 0,8–0,9).

Время нагрева воды до заданной температуры (t) составит:

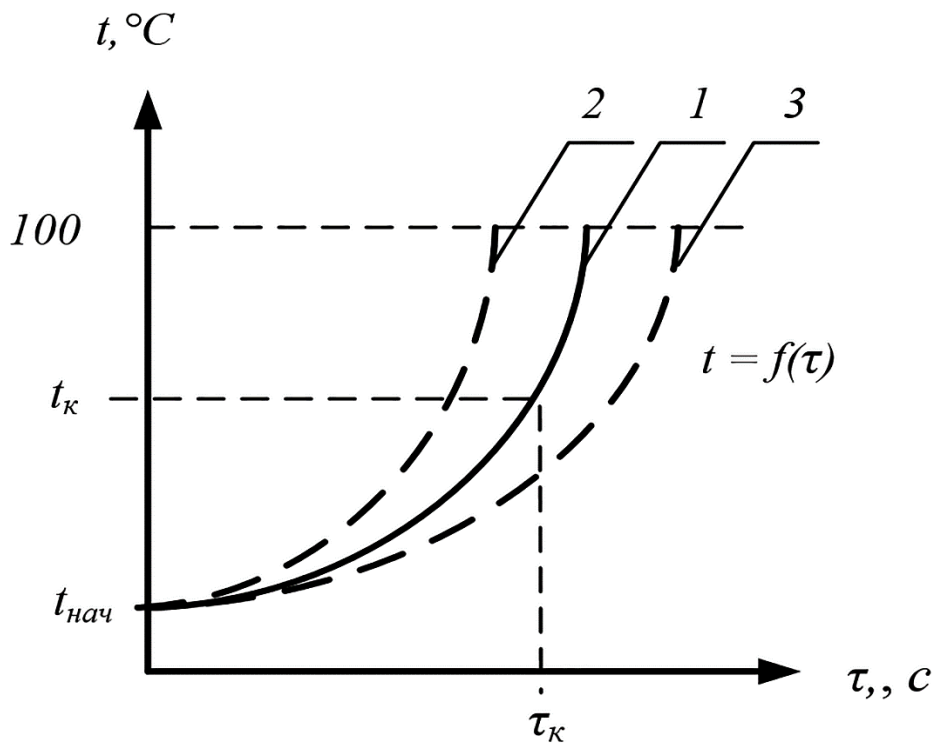
$$\tau = T_H \cdot \ln \frac{20 + t}{20 + t_1} \quad (3.22)$$

Рабочие характеристики электродных водонагревателей периодического действия представлены на рисунках 3.3, 3.4, 3.5.



1 – без учета парообразования; 2 – с учетом парообразования

Рисунок 3.3 – Зависимость мощности электродного водонагревателя от температуры воды $P = f(t)$



1 – при постоянной времени нагрева T_{H1} ; 2 – при постоянной времени нагрева T_{H2} ;
3 – при постоянной времени нагрева T_{H3} ; $T_{H2} < T_{H1} < T_{H3}$

Рисунок 3.4 – Зависимость температуры воды от времени нагрева $t = f(\tau)$

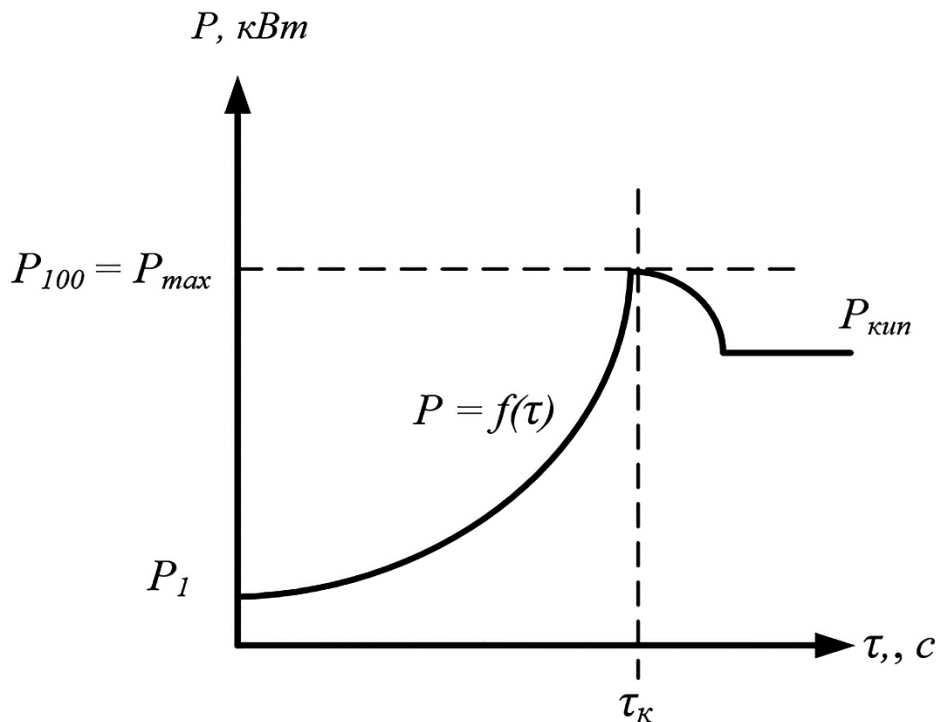


Рисунок 3.5 – Зависимость мощности электродного водонагревателя периодического действия от времени нагрева $P = f(\tau)$

Мощность электродного водонагревателя при нагреве от 0 до 100 °С увеличивается в шесть раз, то есть $P_{100} = 6 \cdot P_0$, тогда как эффективность работы установки оценивается по средней за период нагрева мощности (P_{cp}), которая также определяется по формуле (3.18) с учетом среднего за период нагрева удельного сопротивления воды (ρ_{cp}) (3.9).

Это приводит к тому, что весь проводниковый материал, пускозащитную аппаратуру необходимо рассчитывать и выбирать с учетом максимальной мощности P_{100} , а эффект работы оценивается по средней мощности нагрева, которая примерно в полтора раза меньше максимальной:

$$P_{cp} \approx \frac{P_{100}}{1,5} \quad (3.23)$$

Рабочими характеристиками установившегося режима работы электродного водонагревателя непрерывного действия выступают:

1) *зависимость мощности от температуры воды $P = f(t)$;*

2) зависимость температуры от расстояния, пройденного водой в электродной системе, $t = f(x)$;

3) зависимость плотности тока от высоты электродной системы (распределение плотности тока по высоте электродной системы) $j = f(x)$;

4) зависимость мощности от производительности установки по воде $P = f(m')$.

Проточные водонагреватели (при неизменном расходе $m' - const$) работают в начальный период (с момента включения в сеть) в переходном режиме, а через определенное время выходят на установившийся режим работы, при котором температура выходящей из нагревателя воды стабилизируется и одновременно стабилизируется плотность тока в различных точках электродной системы по ее высоте. Мощность установки с момента включения возрастает от минимального значения P_1 , соответствующего температуре воды в нагревателе перед включением, до установившегося значения P_2 , соответствующего установившемуся распределению плотности тока в электродной системе. Таким образом, для проточных установок имеют место как переходные, так и установившиеся режимы работы.

Зависимость мощности от температуры воды $P = f(t)$ для установок непрерывного действия аналогична этой же характеристике для установок периодического действия.

При расчете зависимости температуры воды от расстояния, пройденного водой в электродной системе $t = f(x)$, расстояние (x) определяется скоростью движения воды (v) и временем (τ):

$$X = v \cdot \tau; \tau = \frac{X}{v} \quad (3.24)$$

Тогда зависимость температуры воды от расстояния, пройденного ею в электродной системе, аналитически может быть представлена выражением:

$$t = (t_{\text{нач}} + 20) \cdot e^{\frac{x}{v \cdot T'_H}} - 20 \quad (3.25)$$

где T'_H – постоянная времени электродного нагрева, с;

v – скорость движения воды между электродами, м/с;

x – пройденное водой расстояние (координата точки от входа в электродную систему по высоте электрода), м.

Скорость движения воды между электродами определяется по формуле (3.26):

$$v = \frac{m'}{\gamma \cdot F_{\text{ж}}} \quad (3.26)$$

где m' – подача воды, кг/с;

γ – плотность воды, кг/м³;

$F_{\text{ж}}$ – площадь живого сечения электродной системы (площадь сечения потока воды, обтекаемая электрическим током), м².

Площадь живого сечения в соответствии с размерами электродных систем в плане (рис. 3.1) определяется:

1) для плоской электродной системы:

$$F_{\text{ж}} = 3 \cdot l \cdot b \quad (3.27)$$

2) для коаксиальной электродной системы:

$$F_{\text{ж}} = \frac{3 \cdot \pi}{4} \cdot (d^2 - d_3^2) \quad (3.28)$$

3) для трехстержневой электродной системы:

$$F_{\text{ж}} = \pi \cdot R^2 - 3 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.29)$$

4) для четырехстержневой электродной системы:

$$F_{\text{ж}} = \pi \cdot (R^2 - d^2) \quad (3.30)$$

Постоянная времени нагрева (T'_H) в проточных электродных водонагревателях определяется по формуле (3.31):

$$T'_H = \frac{40 \cdot m'' \cdot c}{P_{20} \cdot \eta_T}, \quad (3.31)$$

$$\text{где } m'' = F_{ж} \cdot h \cdot \gamma \quad (3.32)$$

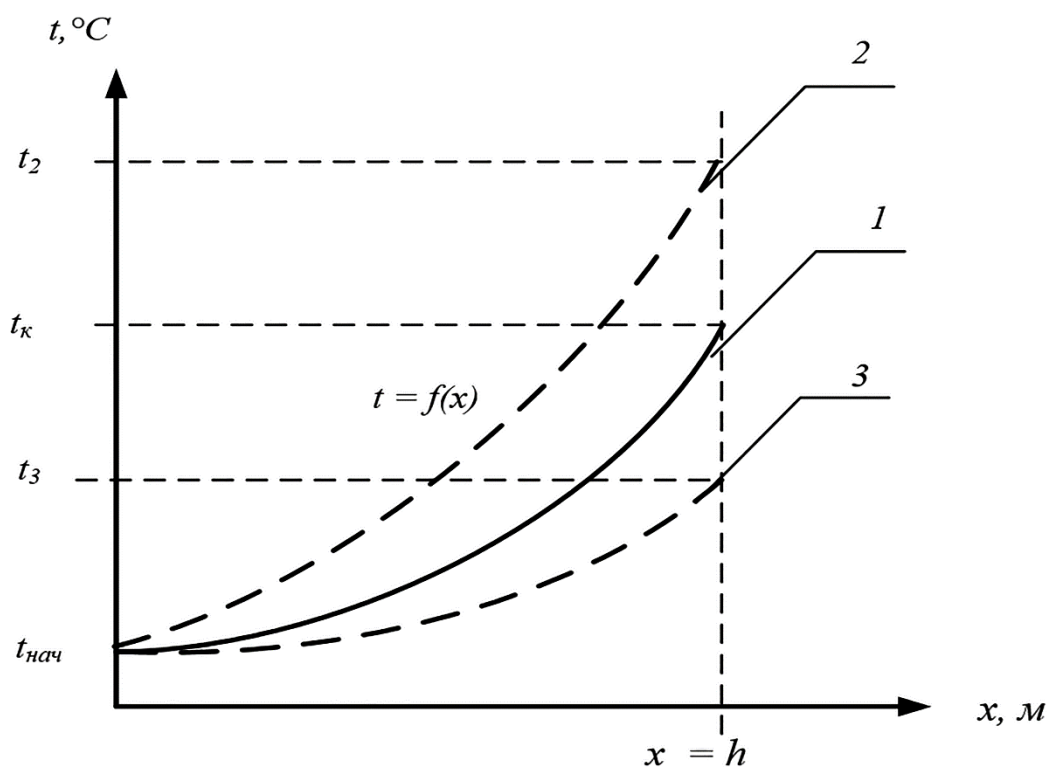
где m'' – масса воды в электродной системе, обтекаемая током, кг;

c – удельная массовая теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

P_{20} – мощность электродной системы при температуре 20 °С, кВт;

h – высота электродной системы, м.

Зависимость температуры от расстояния, пройденного водой в электродной системе, $t = f(x)$ рассчитывается при изменении подачи m' для значений 0,3; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0 от номинальной подачи, полученной в расчете. Графически зависимость представлена на рисунке 3.6.



1 – при скорости движения воды v_1 ; 2 – при скорости движения воды v_2 ;
3 – при скорости движения воды v_3

Рисунок 3.6 – Зависимость температуры воды от расстояния, пройденного водой в электродной системе

Полученное значение конечной температуры для $x = h$ по рабочим характеристикам для номинальной подачи m' должно быть близким к значению конечной температуры, заданной технологическим процессом.

Приведенные на рисунке 3.6 зависимости показывают, что, изменяя скорость движения воды в системе ($v_2 < v_1 < v_3$), можно регулировать температуру воды на выходе из водонагревателя, то есть один и тот же водонагреватель может обеспечивать любой технологический процесс с различной температурой воды. Из зависимостей видно, что при увеличении скорости движения воды понижается температура на выходе.

Плотность тока между электродами определяется по формуле (3.33):

$$j = \frac{U_{\Phi}}{l \cdot \rho_t} \quad (3.33)$$

где U_{Φ} – фазное напряжение электродной системы, В;

l – расстояние между электродами, м;

ρ_t – удельное сопротивление воды при температуре t , Ом·м.

Учитывая, что удельное сопротивление воды зависит от температуры, распределение плотности тока по высоте электродной системы описывается экспонентой (3.34):

$$j = j_1 \cdot e^{\frac{x}{v \cdot T_H}} \quad (3.34)$$

где j_1 – плотность тока на входе в электродную систему, то есть плотность тока, соответствующая начальной температуре воды $t_{нач}$, А/м² и определяемая в соответствии с выражением (3.33);

x – координата точки по высоте электродной системы от входной кромки, м;

v – скорость движения воды в системе, м/с.

Зависимость плотности тока от расстояния, пройденного водой в электродной системе ($j = f(x)$), необходимо рассчитывать для тех же значений подачи m' , что и при расчете зависимости температуры воды от расстояния, пройденного водой в электродной системе.

Графически характеристика представляет собой положительную экспоненту, аналогичную зависимости $t = f(x)$ (рис. 3.6).

Максимальное значение плотности тока, которое имеет место при $x = h$ для номинальной подачи, не должно превышать допустимое значение.

Зависимость мощности от производительности проточного электродного котла по воде $P = f(m')$ объясняется следующим образом. Увеличение производительности по воде ведет к снижению температуры воды в электродной системе, то есть к увеличению сопротивления, что, в свою очередь, вызывает снижение мощности нагрева:

$$\uparrow m' \rightarrow \uparrow v \rightarrow \downarrow \tau \rightarrow \downarrow t_{\text{вых}} \rightarrow \uparrow R \rightarrow \downarrow P$$

Общую мощность электродной системы (P) можно определить интегрированием элементарных мощностей (dP) по высоте электродов в направлении потока воды. В результате математических расчетов аналитически зависимость мощности водонагревателя от подачи $P = f(m')$ может быть определена выражением (3.35):

$$P = P_{1(\text{пог})} \cdot \frac{m' \cdot T'_H}{\gamma \cdot F_{\text{ж}}} \cdot \left(e^{\frac{h \cdot \gamma \cdot F_{\text{ж}}}{m' \cdot T'_H}} - 1 \right) \quad (3.35)$$

где $P_{1(\text{пог})}$ – начальная погонная мощность электродной системы, соответствующая температуре воды $t_{\text{нач}}$, Вт/м;

m' – подача воды, кг/ч;

T'_H – постоянная времени нагрева в электродных установках непрерывного действия, с;

γ – удельная плотность воды, кг/м³;

$F_{\text{ж}}$ – площадь живого сечения, м²;

h – высота электродной системы, м.

Для любого типа электродной системы начальная погонная мощность определяется выражением (3.36):

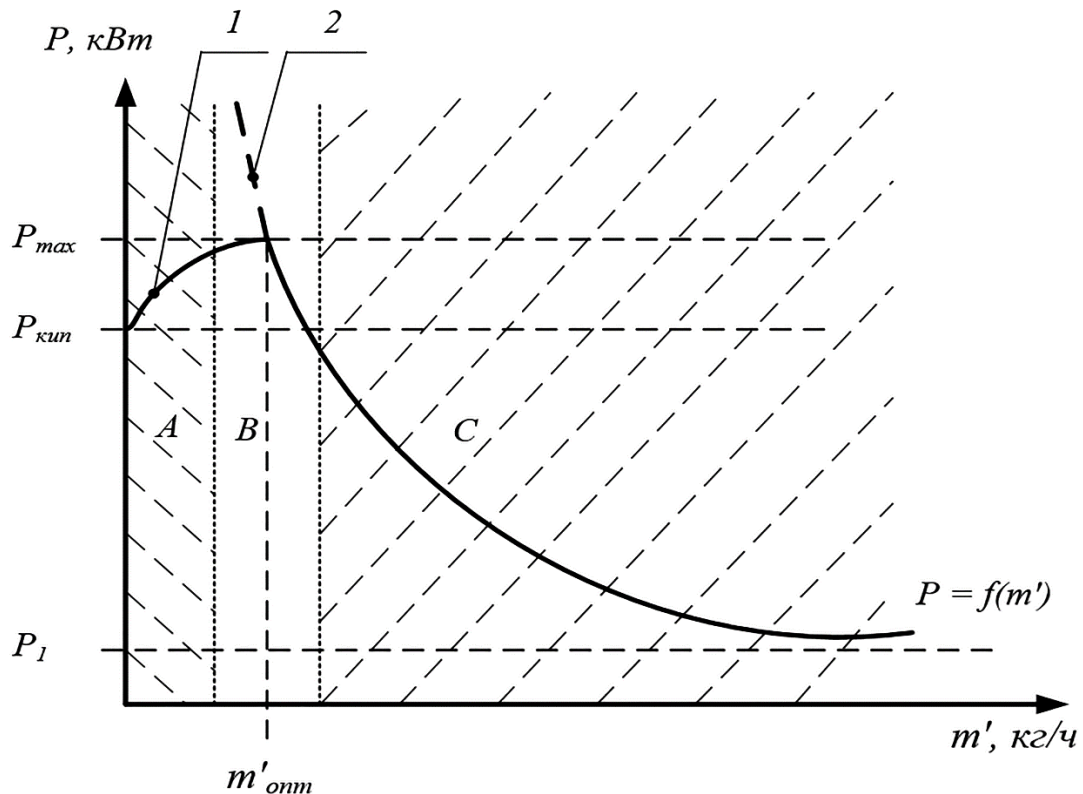
$$P_{1(\text{пог})} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{K_{\Gamma}} \cdot \frac{20 + t_{\text{нач}}}{\rho_{20} \cdot 40} \quad (3.36)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение системы, В;

K_{Γ} – геометрический коэффициент.

Зависимость мощности от подачи воды $P = f(m')$, рассчитанная по теоретической формуле, является идеальной (не учитывает парообразование): при $m' \rightarrow 0$ и $P \rightarrow \infty$, и поэтому ее необходимо корректировать уже рассчитанным

ранее значением мощности кипения $P_{\text{кип}}$, которая будет иметь место при отсутствии подачи ($m' = 0$) и максимально возможной мощности P_{100} , что будет наблюдаться при некоторой оптимальной подаче ($m'_{\text{опт}}$), соответствующей максимально возможной теплопроизводительности ($q = q_{\text{max}}$) установки. График зависимости $P = f(m')$ приведен на рисунке 3.7.



1 – с учетом парообразования; 2 – без учета парообразования

Рисунок 3.7 – Зависимость мощности нагрева проточной ЭТУ от подачи воды $P = f(m')$

Из зависимости (рис. 3.7) видно, что при уменьшении подачи (m') мощность установки будет стремиться к мощности включения (P_1), то есть мощности, соответствующей температуре воды на входе в электродную систему.

Также приведенная характеристика наглядно демонстрирует, что любой водонагреватель может работать в режиме водонагревателя (область C), в режиме парогенератора (область A) и в зоне оптимальной подачи (область B). Достигнуть этих режимов возможно регулировкой расхода (подачи) воды на входном патрубке.

Блокировка в цепи управления водонагревателем предотвращает взрыв водонагревателя от повышения давления в нем при кипении воды и неработающем циркуляционном насосе.

При ручном управлении через контакты переключателя *SA* и реле *KV3* подается питание на катушку промежуточного реле *KV2*, которое замыкает цепь магнитного пускателя *KM2*, и на электроды водонагревателя *EK* подается напряжение.

В автоматическом режиме электродный нагреватель включается магнитным пускателем *KM2* при повороте переключателя в положение «1». Промежуточным реле *KV2* управляет электроконтактный термометр *SK1*. Если температура воды, выходящей из водонагревателя, ниже установленного минимального значения, контакт *SK1* замкнется и сработает реле *KV2*, при этом его контактами включается магнитный пускатель *KM2*, блокируется контакт *SK1* и готовится к работе цепь катушки реле *KV1*. При нагреве воды до установленного максимального значения замыкается контакт *SK1* и срабатывает реле *KV1*, которое своими контактами отключает реле *KV2*, что приводит к отключению магнитного пускателя *KM2*. Повторное включение водонагревателя происходит при снижении температуры воды до установленного минимального значения и замыкании контакта *SK1*.

Если температура воды превысит установленное максимальное значение, электроконтактный термометр *SK2* замкнет цепь катушки реле *KV3*, его размыкающие контакты отключат реле *KV2* и водонагреватель отключится от сети. Для повторного включения переключатель *SA* нужно установить в нулевое положение, а затем в один из режимов работы.

При несимметрии питающего напряжения (например, потере фазы) на корпусе водонагревателя появляется опасный электрический потенциал. Для защиты от неполнофазного режима в нулевом проводе установлено токовое

реле KA , которое срабатывает и отключает водонагреватель при увеличении тока в нулевом проводе до уровня $0,25 \cdot I_n$.

Пример. Рассчитайте трехфазный электродный водонагреватель непрерывного действия с коаксиальной системой для нагрева воды в системе отопления от температуры $t_{нач} = 60$ °С до температуры $t_{кон} = 95$ °С. Мощность составляет $P = 97,5$ кВт. Удельное сопротивление воды при температуре 20 °С соответствует $\rho_{20} = 25$ Ом·м. Система питающего напряжения – 220/127 В.

Решение: Производительность установки составит:

$$m' = \frac{P \cdot 3600}{c \cdot (t_{вых} - t_{вх})}$$

$$m' = \frac{97,5 \cdot 3600}{4,19 \cdot (95 - 60)} = 2393 \text{ кг/ч}$$

Минимальное расстояние между электродами и корпусом бака определяется с учетом формулы (3.2):

$$l_{min} = \frac{U_{\Phi}}{j_{доп} \cdot \rho_{кон}}$$

$$\rho_{кон} = \frac{25 \cdot 40}{20 + 95} = 8,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$l_{min} = \frac{127}{20000 \cdot 8,3} = 0,00076 \text{ м}$$

По условию минимально допустимое расстояние принимается 0,01 м.

Для определения диаметра электродов определяется минимально возможная площадь электродов по формуле (3.6). Для этого проводятся предварительные расчеты.

Среднее за период нагрева удельное сопротивление воды находят по формуле (3.9). В результате получаем:

$$\rho_{ср} = \frac{40 \cdot 25}{100 - 60} \cdot \ln \frac{20 + 95}{20 + 60} = 10,14 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Средняя плотность тока на электродах по формуле (3.8) составит:

$$j_{\text{ср}} = \frac{127}{0,01 \cdot 10,14} = 1253 \text{ А/м}^2$$

Таким образом, получаем минимально возможную площадь электродов:

$$S_{\text{min}} = \frac{296}{1253} \cdot 1,2 = 0,284 \text{ м}^2$$

Диаметр фазного электрода составит:

$$d_{\text{э}} = \sqrt{\frac{S_{\text{min}}}{2\pi}}; d_{\text{э}} = \sqrt{\frac{0,284}{2 \cdot 3,14}} = 0,213 \text{ м}$$

Диаметр наружного (нейтрального) электрода составит:

$$d = d_{\text{э}} + 2 \cdot l; d = 0,213 + 2 \cdot 0,01 = 0,233 \text{ м}$$

Геометрический коэффициент системы определяем по формуле, приведенной в таблице 3.1:

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \ln \frac{0,233}{0,213} = 0,0143$$

Фазное сопротивление электродной системы по формуле (3.11) составит:

$$R_{\phi} = \frac{3 \cdot 127^2}{113 \cdot 10^3} = 0,429 \text{ Ом}$$

Тогда высота электрода по выражению (3.10) равна:

$$h = \frac{0,0143}{0,429} \cdot 10,14 = 0,3386 \text{ м}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Известны размеры электродной системы емкостного водонагревателя с плоскими электродами: расстояние между электродами составляет $l = 0,02$ м, ширина электрода $b = 0,1$ м, его высота $h = 0,2$ м. Удельное сопротивление воды при температуре 20 °С равно $\rho_{20} = 30$ Ом·м; начальная температура воды $t_1 = 4$ °С; конечная температура воды $t_2 = 95$ °С. Водонагреватель трехфазный четырехэлектродный. Напряжение сети – 380/220 В. Масса воды в нагревателе

составляет $m = 200$ кг. Рассчитайте рабочие характеристики нагревателя и среднюю мощность за период нагрева.

2. Электродный водонагреватель периодического действия со стержневыми электродами (диаметр электрода $d_э = 0,15$ м), установленными вертикально на расстоянии друг от друга между ближайшими точками поверхности $l = 0,015$ м, имеющими высоту $h = 0,3$ м, обеспечивает нагрев воды (масса которой $m = 400$ кг) от начальной температуры $t_1 = 20$ °С до заданной $t_2 = 90$ °С. Удельное сопротивление воды при температуре 20 °С равно $\rho_{20} = 40$ Ом·м. Водонагреватель трехфазный. Схема электродной системы – четырехэлектродная. Расстояние от внешней поверхности электродов (при симметричной установке относительного центра бака) до стенки бака $l_б = d_э \cdot K_Г$, где $K_Г$ – геометрический коэффициент электродной системы. Рассчитайте рабочие характеристики нагревателя, если напряжение сети 330/220 В. Определите время нагрева до заданной температуры и среднюю мощность за период нагрева.

3. Рассчитайте рабочие характеристики емкостного водонагревателя с коаксиальной системой электродов. Наружные электроды присоединены к нейтральному проводу сети. Диаметр фазного электрода $d_э = 0,1$ м. Расстояние между поверхностями фазного и нейтрального электрода $l = 0,02$ м. Высота электродов $h = 0,15$ м. Удельное сопротивление воды при температуре 20 °С равно $\rho_{20} = 20$ Ом·м. Начальная температура воды $t_1 = 2$ °С, конечная температура $t_2 = 55$ °С. Масса нагреваемой воды $m = 600$ кг. Определите время нагрева до заданной температуры и среднюю за период нагрева мощность. Число групп трехфазных электродных систем $n = 2$. Напряжение сети 380/220 В.

4. Электродный водонагреватель проточного типа с коаксиальными электродами подогревает воду в системе отопления с параметрами: температура входящей воды $t_1 = 60$ °С; температура выходящей воды $t_2 = 95$ °С; подача воды $m' = 300$ кг/ч; удельное сопротивление воды при температуре 20 °С – 30 Ом·м;

геометрический коэффициент формы электродов $K_f = 0,04$. Определите расчетную мощность, высоту электродной системы и значение мощности котла при увеличении подачи в два и три раза от номинальной. При определении скорости движения воды в электродной системе следует иметь в виду, что вся подаваемая вода проходит в зазоре между коаксиальными электродами. Определите, как изменится температура воды на выходе нагревателя при указанном изменении подачи. Напряжение сети 380/220 В. Рассчитайте и постройте рабочие характеристики водонагревателя.

5. Проточный электродный котел с плоскими электродами обеспечивает отопительную систему с параметрами: температура входящей воды $t_1 = 70$ °С; температура выходящей воды $t_2 = 90$ °С; подача $m' = 500$ кг/ч; удельное сопротивление воды при температуре 20 °С $\rho_{20} = 20$ Ом·м. Определите размеры электродов, если расстояние между ними равно $l = 0,02$ м, мощность котла при подаче $2m'$ и $3m'$. Рассчитайте и постройте рабочие характеристики водонагревателя. Напряжение сети 220/380 В. Нагреватель трехфазный.

6. Рассчитайте проточный электродный водоподогреватель с тремя стержневыми электродами из имеющихся в наличии стальных труб диаметром $d_s = 0,06$ м. Водонагреватель предназначен для подогрева воды в системе горячего водоснабжения фермы. Вода поступает из скважины при температуре $t_1 = 4$ °С и подогревается до заданной температуры $t_2 = 80$ °С. Производительность водонагревателя по воде $m' = 100$ кг/ч. Водонагреватель трехфазный. Напряжение питания 380/220 В.

7. Рассчитайте рабочие характеристики электродного водонагревателя периодического действия, имеющего объем $V = 2,5$ м³, заполненный водой; напряжение питания – 380/220 В. Известно, что в момент включения он потребляет мощность $P_1 = 200$ кВт при температуре воды в баке $t_1 = 40$ °С. Определите время нагрева до заданной температуры $t_2 = 95$ °С. КПД водонагревателя принять равным $\eta = 0,9$.

8. Рассчитайте электродную систему четырехстержневого электродного парового котла с требуемой паропроизводительностью $m' = 120$ кг/ч, если известны: удельное сопротивление воды $\rho_{20} = 60$ Ом·м; температура возвращающегося в котел конденсата $t_l = 80$ °С; теплосодержание пара $i = 2\,760$ кДж/кг. Рассчитайте и постройте переходные (пусковые) характеристики котла. Температура воды перед пуском составляет $t_{нач} = 5$ °С. Расчет режима парообразования вести с учетом влияния избыточного давления пара $p = 5 \cdot 10^5$ Па, под которым работает котел. Определите время пуска котла.

9. Рассчитайте электродную систему и рабочие характеристики парового котла с плоскими электродами (схема включения электродов представлена на рисунке 3.9) с требуемой паропроизводительностью $m' = 50$ кг/ч, если известны: удельное сопротивление воды $\rho_{20} = 50$ Ом·м; температура возвращающегося в котел конденсата $t_l = 20$ °С. Избыточного давления в котле нет. Определите мощность котла в установившемся режиме работы. Как изменятся параметры котла, если он будет работать под давлением $p = 6 \cdot 10^5$ Па? Теплосодержание пара при $p = 0$ составляет $i = 2\,760$ кДж/кг.

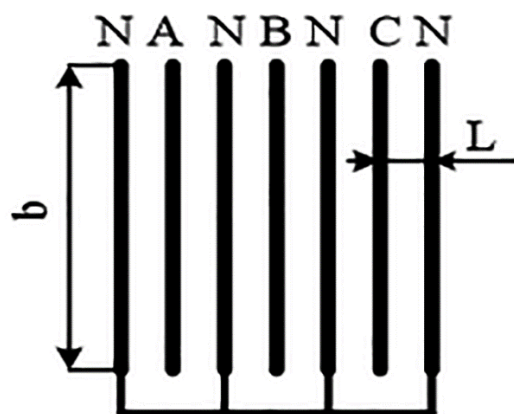


Рисунок 3.9 – Схема включения электродов

10. Электродный паровой котел с коаксиальными электродами имеет известные размеры электродной системы: диаметр фазного электрода $d_э = 18$ мм; расстояние между электродами $l = 10$ мм; высота электрода $h = 0,5$ м. Определите

мощность котла в режиме парообразования и его паропроизводительность, если известны: удельное сопротивление воды $\rho_{20} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; начальная температура поступающей воды $t_1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; теплосодержание пара $i = 2760 \text{ кДж/ч}$. Котел работает при атмосферном давлении. При какой подаче воды прекратится парообразование и котел перейдет в режим водонагревателя? Какова будет при этом его мощность?

Контрольные вопросы

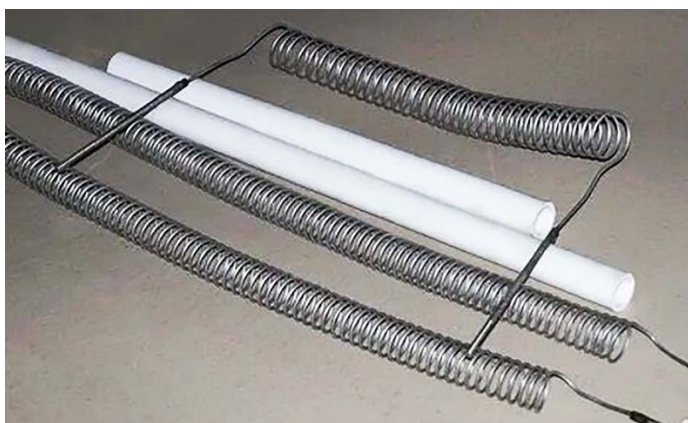
1. Раскройте принцип действия электродного нагрева воды.
2. Назовите основные конфигурации электродных систем.
3. В чем преимущество электродного нагрева воды?
4. Почему ограничивается плотность тока на электродах?
5. Для чего устанавливается изолирующая вставка при использовании электродного водонагревателя?
6. Как изменяется мощность в процессе нагрева в электродных водонагревателях?
7. Какова схема замещения коаксиальной электродной системы?
8. Из каких материалов изготавливаются электроды для нагрева воды?
9. Как зависит мощность электродной ЭТУ непрерывного действия от производительности по нагреваемому материалу?
10. Перечислите основные недостатки электродного нагрева жидкостей.
11. Каким образом осуществляется регулировка мощности в электродных водонагревателях?
12. Назовите рабочие характеристики электродных водонагревателей периодического и непрерывного действия.

4 КОСВЕННЫЙ НАГРЕВ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Косвенный нагрев сопротивлением используют для нагрева как проводящих, так и непроводящих материалов. При этом основным узлом, реализующим преобразование электрической энергии в тепловую, является нагревательный элемент, а нагрев среды происходит за счет теплопередачи конвекцией, излучением, теплопроводностью.

Косвенный нагрев применяется при необходимости нагрева материалов, обладающих высокой чувствительностью к электрическому току, воздействие которого приводит к изменению электрофизических и технологических свойств обрабатываемого материала.

По конструктивному исполнению нагревательные элементы подразделяются на открытые (нагревательное сопротивление не изолируется от нагреваемой среды), закрытые (в защитном кожухе), герметичные (ТЭН) (рис. 4.1).



а)

б)

а) открытые нагревательные элементы из нихромовой проволоки;

б) герметичные нагревательные элементы (ТЭН)

Рисунок 4.1 – Нагревательные элементы

Открытые нагревательные элементы из специальных сплавов. Открытые нагревательные элементы характеризуются удельной поверхностной мощностью электрических нагревателей, определяемой по формуле (4.1):

$$\Delta P = \frac{P}{F} \quad (4.1)$$

где P – мощность нагревательного элемента, Вт;
 F – площадь поверхности теплоотдачи, м².

В установившемся режиме работы электрическая мощность, выделяющаяся в теле нагрева, равна:

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{Т}} = P$$

где $P_{\text{Т}}$ – тепловая мощность, отдаваемая телом в окружающую среду, Вт.

Соответственно, удельная поверхностная электрическая мощность нагрева определяется выражением (4.2):

$$\Delta P_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{эл}}}{F} = \frac{I^2 \cdot r_t}{F} = \frac{4 \cdot I^2 \cdot \rho_t}{\pi^2 \cdot d^3} \quad (4.2)$$

где I – ток нагревательного элемента, А;

r_t – сопротивление нагревательного элемента, Ом;

ρ_t – удельное сопротивление материала нагревательного элемента, Ом·м;

d – диаметр круглого провода, из которого выполнено тело нагрева, м.

Тепловая удельная поверхностная мощность находится из формулы (4.3):

$$\Delta P_{\text{Т}} = \frac{t - t_0}{R_{\text{Т}}} \quad (4.3)$$

где t – температура поверхности нагревательного элемента, °С;

t_0 – температура окружающей среды, °С;

$R_{\text{Т}}$ – термическое сопротивление теплопередачи от нагревателя окружающей среде, (м²·°С)/Вт.

Допустимая удельная поверхностная мощность нагревательного элемента представляет собой удельную тепловую поверхностную мощность, которую имеет нагреватель при максимально допустимой (для него) температуре, при которой он может работать длительно, не разрушаясь:

$$\Delta P_{\text{доп}} = \Delta P_{T(\text{max})} = \frac{t_{\text{доп}} - t_0}{R_T} \quad (4.4)$$

Допустимая поверхностная мощность проволочных открытых нагревателей определяется из выражения (4.5):

$$\Delta P_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{доп(ид)}} \cdot a_{\text{э}} \cdot a_{\text{г}} \cdot a_{\text{р}} \cdot a_{\text{с}} \quad (4.5)$$

где $\Delta P_{\text{доп(ид)}}$ – допустимая поверхностная мощность идеализированного нагревательного элемента, представляющего собой провод диаметром 1 мм, длиной 1 м, подвешенный горизонтально в спокойном воздухе, имеющем температуру 20 °С, Вт/м²;

$a_{\text{э}}$ – коэффициент эффективности излучения;

$a_{\text{г}}$ – коэффициент, учитывающий геометрию нагревателя;

$a_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий влияние относительных размеров нагревателя и нагреваемого тела;

$a_{\text{с}}$ – коэффициент, учитывающий теплопоглощающие свойства среды.

Коэффициент эффективности излучения характеризует эффективность излучения данной системы нагревателя (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента эффективности при нагреве материала

Тип нагревателя и способ укладки	Коэффициент эффективности при нагреве изделий	
	из стали	из алюминия
Проволочный спиральный на трубе	0,46	0,5
Проволочный спиральный на полочке	0,39	0,47
Проволочный спиральный в пазу	0,31	0,35
Проволочный зигзагообразный в пазу	0,56	0,63
Проволочный зигзагообразный свободно повешенный	0,62	0,68

Коэффициент, определяющий геометрию нагревателя, учитывает зависимость $\Delta P_{\text{доп}}$ от относительного виткового расстояния (h/d) (рис. 4.2).

Коэффициент, определяющий влияние относительных размеров нагревателя и нагреваемого тела, учитывает влияние относительных размеров нагреваемого тела на $\Delta P_{\text{доп}}$ и зависит от отношения площади тепловоспринимающей поверхности нагреваемого тела ($F_{\text{н.т}}$) к площади поверхности стен установки, занятых нагревателями ($F_{\text{ст}}$).



Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента, учитывающего геометрию нагревателя, от соотношения $\frac{h}{d}$

Если это соотношение больше или равно 0,8, данный коэффициент равен единице; при соотношении меньшем 0,3 поправки на размер нагреваемого тела (a_p) и коэффициент, учитывающий теплопоглощающие свойства среды (a_c), не вводят.

Коэффициент, учитывающий теплопоглощающие свойства среды, определяет влияние на удельную поверхностную мощность приведенного коэффициента излучения реального нагревателя, определяемого из выражения (4.6):

$$c_{пр} = \frac{5,7}{\frac{1}{c_{н.т}} + \frac{F_{н.т}}{F_{ст}} \cdot \left(\frac{1}{c_n} - 1\right)} \quad (4.6)$$

где $c_{н.т}$ и c_n – относительные коэффициенты теплового излучения (степень черноты) соответственно нагревателя и нагреваемого тела (табл. 4.2).

Для частного случая допустимую удельную поверхностную мощность ($\Delta P_{доп}$) нагревателей из проволоки круглого сечения, помещенных горизонтально в воздухе (подвешенных) при температуре 20 °С, рассчитывают по выражению (4.7):

$$\Delta P_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{доп(ид)}}}{d^{0,4}} \quad (4.7)$$

где d – диаметр проволоки нагревательного элемента, м.

Таблица 4.2 – Коэффициенты теплового излучения некоторых материалов

Материал	Температура, К	Коэффициент теплового излучения
Графит	1 273–3 703	0,77–0,83
Кирпич шамотный	293–1 273	0,80–0,90
Латунь с тусклой поверхностью	323–623	0,22
Нихром	398–1308	0,64–0,75
Сталь	1 213–1 373	0,55–0,61
Цинк окисленный	673	0,11

Определение диаметра провода можно провести аналитическим и графо-аналитическим методами.

Аналитический метод предполагает использование выражения (4.8):

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot I^2}{\pi^2 \cdot \Delta P_{\text{доп}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot \Delta P_{\text{доп}} \cdot U_{\text{ф}}^2}} \quad (4.8)$$

где ρ_t – удельное сопротивление материала нагревательного элемента при конечной температуре нагрева, Ом·м;

P – мощность нагревательного устройства, Вт;

$U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение на нагревательном элементе, В.

Графо-аналитический метод. Рассчитываются и строятся зависимости удельной поверхностной и удельной допустимой поверхностной мощностей от диаметра проволоки нагревателя (4.9) на одном графике (рис. 4.3):

$$\Delta P_{\text{э}} = \frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot d^2 \cdot U_{\text{ф}}^2}; \quad (4.9)$$

$$\Delta P_{\text{э}} = \frac{\Delta P_{\text{доп(ид)}}}{d^{0,4}}$$

По графикам определяется оптимальный (минимально допустимый) диаметр проволоки нагревателя ($d_{\text{опт}}$) и для дальнейших расчетов принимается ближайший больший ($d_{\text{пр}}$) в ряду стандартных диаметров проволоки:

$$d_{\text{пр}} \geq d_{\text{опт}}$$

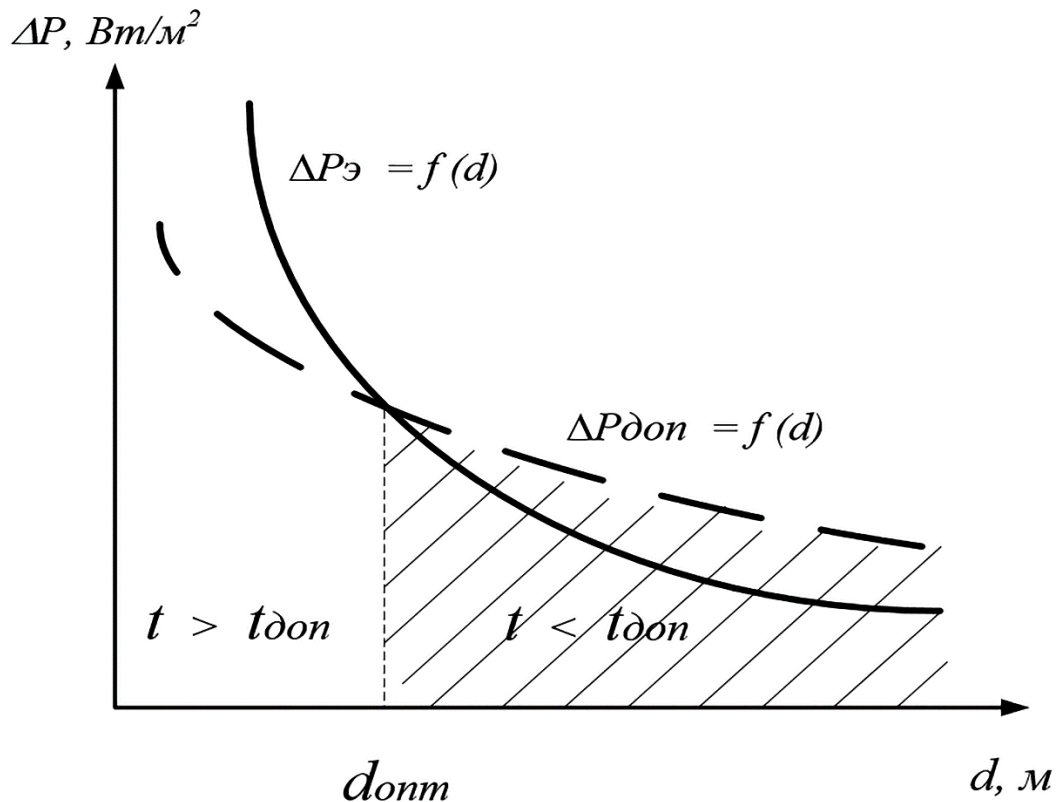


Рисунок 4.3 – Графическое определение диаметра проволоки нагревателя

По формуле (4.10) определяется длина провода нагревательного элемента:

$$l = \frac{r_t \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho_t} = \frac{U_{\phi}^2 \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot P \cdot \rho_t} \quad (4.10)$$

4.1 Расчет проволочного электрокалорифера

По определенной в соответствии с уравнением теплового баланса мощности системы общего отопления необходимо выбрать число и единичную мощность отдельных электрокалориферных установок. При этом следует исходить из следующих соображений: *число калориферов не должно быть меньше двух для обеспечения надежности отопления и равномерности распределения теплоты по помещению.*

По принятому числу электрокалориферов (n) определяется их единичная мощность:

$$P_k = \frac{P_{от}}{n} \quad (4.11)$$

где $P_{от}$ – требуемая мощность электроотопительной установки, определяемая на основе уравнения теплового баланса, кВт.

Определяются основные электрические параметры установки. Линейный ток калорифера находят по формуле (4.12):

$$I_l = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (4.12)$$

где U – линейное напряжение сети, В.

В соответствии с линейным напряжением выбирается схема включения нагревательных элементов – звезда или треугольник.

Из соображений необходимости регулирования температуры воздуха или теплопроизводительности установки выбирается число секций электрокалорифера в соответствии с таблицей 4.3.

Таблица 4.3 – Выбор числа секций электрокалорифера

Мощность электрокалорифера, кВт	16–25	25–40	60–100
Число нагревательных секций	2	3	4

Учитывая число секций (Z) и число фаз (m), определяется мощность одного нагревательного элемента (P_1):

$$P_1 = \frac{P_k}{Z \cdot m} \quad (4.13)$$

Ток одного нагревательного элемента (I_1) составит:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_\phi} \quad (4.14)$$

Сопротивление нагревательного элемента будет равно:

$$r = \frac{U_{\phi}}{I_1} \quad (4.15)$$

Материал нагревательного элемента должен отвечать определенным требованиям:

1. Требования по рабочей температуре, к которым относятся:

1) жаростойкость (во избежание окисления материала при высоких температурах);

2) жаропрочность (для обеспечения механической прочности при высоких температурах);

3) малый температурный коэффициент, который отражает степень изменения удельного сопротивления проводника при изменении температуры.

2. Требования по эксплуатационным показателям:

1) технологичность (возможность завивки в спираль, укладки зигзагом и другое);

2) большое удельное сопротивление материала для обеспечения размещения нагревательного элемента в достаточно малом объеме;

3) постоянство физических свойств, обеспечивающее неизменность сопротивления нагревательного элемента в процессе эксплуатации, а, следовательно, постоянство мощности и других электрических параметров.

Наиболее полно предъявляемым требованиям отвечает группа специальных сплавов, одним из которых (с самыми удовлетворительными характеристиками) является нихром. Различают двойные нихромы (сплав никеля и хрома) и тройные (с добавлением железа). Характеристики материалов нагревательных элементов приведены в приложении К.

Исходя из заданной рабочей температуры ($t_{раб}$), равной 400–600 °С, определяется расчетная температура ($t_{расч}$) нагревательного элемента, приведенная к условиям таблицы нагрузок нихромовых проводов (приложение К):

$$t_{\text{расч}} = t_{\text{раб}} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{с}} \quad (4.16)$$

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент монтажа (табл. 4.4);

$K_{\text{с}}$ – коэффициент среды, который учитывает изменение теплоотдачи в реальных условиях по сравнению с табличными (табл. 4.5).

Таблица 4.4 – Коэффициенты монтажа для некоторых конструкций нагревателей

Конструкция нагревателя	Коэффициент монтажа
Проволока, размещенная горизонтально в спокойном воздухе	1,0
Спираль из проволоки в спокойном воздухе	0,8–0,9
Спираль из проволоки на огнестойком каркасе в спокойном воздухе	0,7
Проволока на огнестойком каркасе в спокойном воздухе	0,6–0,7

Таблица 4.5 – Коэффициент для некоторых условий окружающей среды

Условия окружающей среды	Коэффициент среды
Нагреватель в потоке воздуха, скорость которого 3 м/с	1,8
Нагреватель в потоке воздуха, скорость которого 5 м/с	2,1
Нагреватель в потоке воздуха, скорость которого 10 м/с	3,1
Нагреватель в воде	2,5
Нагреватель в потоке жидкости	3 и более

Таблица нагрузок составлена для нагревательного элемента из неизолированной нихромовой проволоки круглого сечения, подвешенного в неподвижной воздушной среде. Коэффициент монтажа учитывает ухудшение теплоотдачи нагревательного элемента при завивке провода в спираль, а коэффициент среды – улучшение теплоотдачи, связанное с подвижностью среды.

Следует учитывать, что при рабочей температуре больше 700 °С не рекомендуется применять для элементов проволоку диаметром менее 5 мм и ленту толщиной менее 1,5 мм, так как малое сечение из-за окисления металла приводит к значительному сокращению срока службы нагревателей.

Также следует учесть, что температура рабочей поверхности нагревателя должна удовлетворять условию (4.17):

$$t_{\text{раб}} = \frac{t_{\text{расч}}}{K_{\text{м}} \cdot K_{\text{с}}} \leq t_{\text{max}} \quad (4.17)$$

где t_{max} – максимально допустимая температура нагрева для материала нагревателя, °С.

По величине тока (I_l) и температуры ($t_{расч}$) из таблицы нагрузок (приложение Л) выбирается диаметр нихромового провода (d) и площадь поперечного сечения (F). Диаметр принимается такой, для которого выполняются условия по току ($I \geq I_l$) и по температуре ($t \leq t_{расч}$) при возможно меньшем отличии табличных значений от I_l и $t_{расч}$.

Для принятого провода рассчитывают погонные сопротивления при температуре 20 °С (r_{20}) и при рабочей температуре ($r_{раб}$):

$$r_{20} = \frac{\rho_{20}}{F}, \quad (4.18)$$

$$r_{раб} = r_{20} \cdot [1 + \alpha_t \cdot (t_{раб} - 20)] \quad (4.19)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление материала провода при температуре 20 °С, Ом·м (приложение К);

F – площадь поперечного сечения выбранного провода, м²;

α_t – температурный коэффициент изменения сопротивления материала провода, град⁻¹ (приложение К).

Исходя из величин сопротивлений r_1 и $r_{раб}$, определяется длина провода для одного нагревательного элемента:

$$l_1 = \frac{r_1}{r_{раб}} \quad (4.20)$$

Конструктивные размеры нагревательного элемента определяются из условия достаточной механической прочности нагревателей. Исходной величиной для расчета является диаметр провода (d). Определяют:

1) диаметр спирали:

$$d_{сп} = (8 \dots 10) \cdot d \quad (4.21)$$

2) шаг спирали:

$$h_{сп} = (2 \dots 4) \cdot d \quad (4.22)$$

3) количество витков спирали:

$$n = \frac{l_1}{\sqrt{(\pi \cdot d_{\text{сп}})^2 + h^2}} \quad (4.23)$$

4) длину спирали:

$$L_{\text{сп}} = h \cdot n \quad (4.24)$$

Следует иметь ввиду, что расстояние между точками крепления спирали (l_k) (во избежание вибрации и ее деформации под действием потока воздуха) должно отвечать условию (4.25):

$$l_k \leq (10 \dots 15) \cdot d_{\text{сп}} \quad (4.25)$$

Живое сечение калорифера представляет собой окно, через которое поступает воздух, и определяется по формуле (4.26):

$$F_k = \frac{L_k}{v} \quad (4.26)$$

где L_k – подача (производительность) калориферной вентиляционной установки, м³/с;

v – скорость воздуха в электрокалорифере, м/с (для животноводческих помещений принимается равной 6–12 м/с).

Подача (производительность) калориферной вентиляционной установки определяется по минимальной вентиляционной норме, при которой должны работать электрокалориферы:

$$L_k = \frac{L_{\text{min}}}{3600 \cdot n} \quad (4.27)$$

где L_{min} – минимальная вентиляционная норма по условию удаления всех вредных примесей из помещения, м³/с;

n – число электрокалориферов.

Исходя из величины живого сечения калорифера, определяется ширина (B) и высота (H) окна калорифера. В окне вертикально равномерно располагают спирали в коридорном или шахматном порядке, с расстоянием друг от друга не менее диаметра спирали. Длина корпуса электрокалориферов в

направлении потока воздуха (Z_k) определяется необходимостью размещения всех нагревательных элементов.

На рисунке 4.4 приведен эскиз электрокалорифера с указанием основных конструктивных размеров, которые необходимо рассчитать.

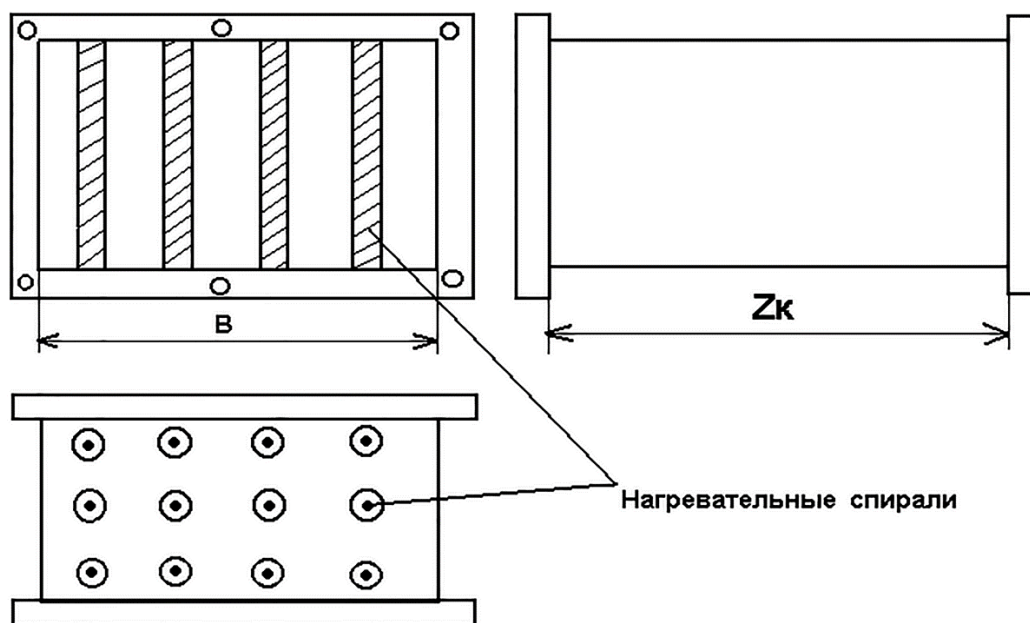


Рисунок 4.4 – Эскиз электрокалорифера

4.2 Расчет средств местного обогрева

Средства местного электрообогрева используются для уменьшения мощности общего отопления и создания в месте нахождения молодняка или больных ослабленных животных зоны повышенной температуры. По принципу действия их можно разделить на три группы:

- 1) *средства контактного обогрева* (электрообогреваемые полы, площадки, коврики);
- 2) *средства конвективного обогрева* (электрообогреваемые панели, электрокалориферы малой (до 5 кВт) мощности, электроконвекторы, электрорадиаторы);

3) средства лучистого обогрева, которые, в свою очередь, подразделяются на два вида: темные и светлые.

В спектре излучения светлых источников, кроме инфракрасного, присутствует и видимое излучение. К ним можно отнести инфракрасные лампы накаливания типа ИКЗК 215-225-250 (инфракрасная с зеркальной красной колбой мощностью 250 Вт); ИКЗ 215-225-500 (инфракрасная с зеркальной колбой мощностью 500 Вт). У темных источников спектр излучения находится только в инфракрасной области. К ним можно отнести трубчатый электронагреватель (ТЭН) (диапазон мощностей от 250 до 800 Вт). Однако КПД ТЭН очень низок и составляет около 30 %, тогда как КПД инфракрасных ламп порядка 80 %.

Наибольшее применение находят электрообогреваемые полы (ЭОП), коврики, площадки и инфракрасные облучатели (ИКО).

Конструктивно устройства выполняются следующим образом. В помещениях содержания взрослого поголовья крупного рогатого скота местный обогрев рассчитывается для больных животных (предположительно составляющих 10 % от всего поголовья). Электрообогреваемые полы монтируются вдоль всего ряда стойл шириной 0,6–0,8 м. При групповом содержании молодняка они выполняются по всей площади.

Как показано на рисунке 4.5, при устройстве электрообогреваемого пола уплотняют грунт 7; для выравнивания на него насыпают слой песка 4 толщиной 15–20 мм, а затем укладывают гидроизоляцию 6 в виде листов толя или полиэтиленовой пленки, в один – два слоя.

Поверх гидроизоляции насыпают слой песка, на котором размещают тепловую изоляцию 5 (котельный шлак или керамзит) толщиной 80–150 мм. Изоляцию уплотняют и присыпают песком, после чего укладывают бетон 1. В слое бетона на глубине 4–6 см прокладывают нагревательные элементы 3 (нагревательные провода).

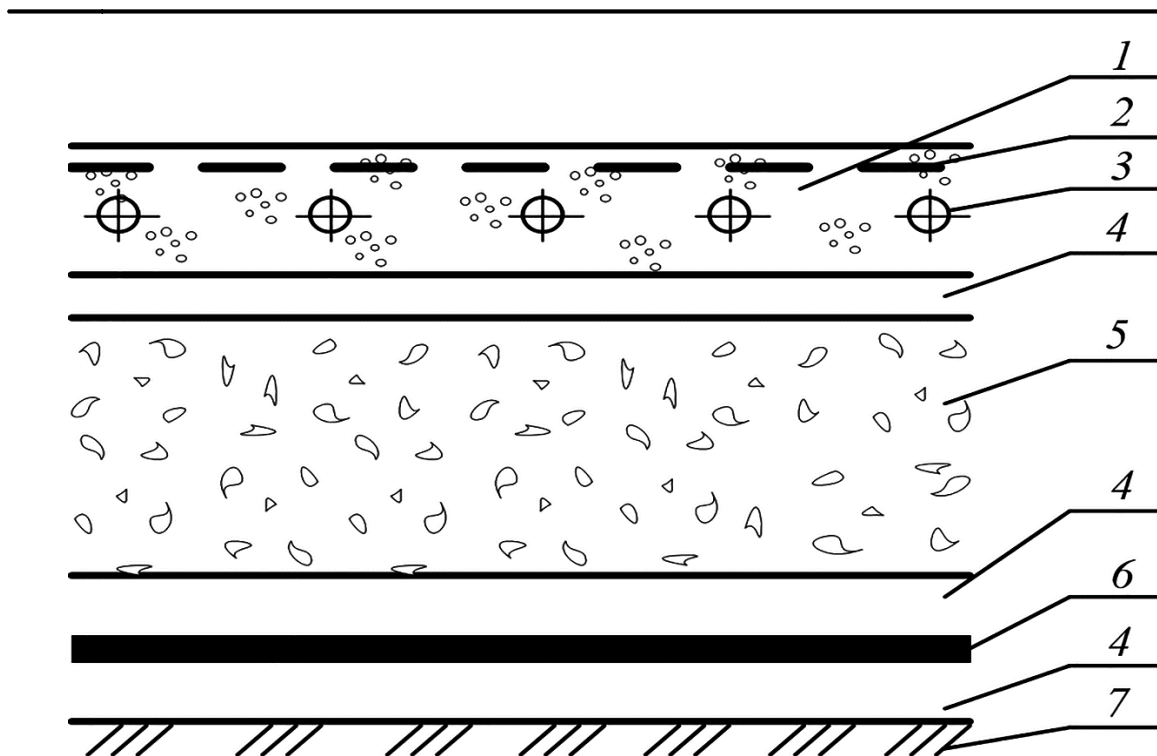


Рисунок 4.5 – Конструкция электрообогреваемого пола

При питании сетевым напряжением над нагревательными элементами на глубине 2 см от поверхности закладывают стальную сетку 3, соединенную с нулевым проводом питающей сети. Сетка защищает нагревательный элемент от повреждений в случае разрушения бетонного покрытия, а также служит устройством выравнивания электрических потенциалов, защищая животных от шагового напряжения.

В качестве нагревательного элемента применяются нагревательные провода марок ПОСХВ (провод обогревательный сельскохозяйственного назначения с поливинилхлоридной изоляцией), ПОСХП (с полиэтиленовой изоляцией), ПНВСВ (провод повышенной надежности, имеющий дополнительную изоляцию из фторопластовой ленты и экранирующую сетку из стальных проволочек для обеспечения механической прочности). Провода отличаются термостойкой изоляцией (рис. 4.6). Техническая характеристика нагревательных проводов и кабелей приведена в приложении Б.



Рисунок 4.6 – Нагревательные провода и кабели

Электрообогреваемые коврики и плиты представляют собой съемные устройства, укладываемые на бетонный или деревянный пол. Коврики изготавливают из двух слоев листовой резины площадью 0,6–0,8 м², между которыми укладывают нагревательный провод.

Инфракрасные облучатели при станковом и боксовом индивидуальном содержании животных проектируются из расчета установки как минимум одного облучателя над каждым животным.

Для случая смешанного использования средств контактного (с использованием электрообогреваемых полов) и лучистого (с использованием инфракрасных облучателей) обогрева мощность (100 %) между ними может распределяться в следующих соотношениях:

- 1) 100 % + 100 %, то есть общая мощность равна двойной потребной мощности местного обогрева;
- 2) 60 % + 40 % – соответственно электрообогреваемый пол и инфракрасный облучатель, при этом общая мощность равна потребной.

Наиболее рациональными следует считать такие устройства, у которых имеется возможность регулирования мощности электрообогреваемого пола в пределах 100–60 % и инфракрасного облучателя в пределах 100–40 % от потребной мощности. Это позволяет обеспечить высокую готовность к работе и высокую надежность при работе по свободному графику и в случае аварийных перерывов в электроснабжении.

Расчет электрообогреваемого пола с использованием нагревательных проводов. Мощность электрообогреваемого пола животноводческих помещений зависит от вида и возраста животных, а также значений параметров отопительных установок. В случае использования электрообогреваемого пола для общего отопления мощность рассчитывается также, как и для общего отопления при помощи электрокалориферов, на основе уравнения теплового баланса. При использовании электрообогреваемого пола в качестве устройств местного обогрева животных общая мощность определяется по нормам обогреваемой площади:

$$P_{м.о} = P_{уд} \cdot f \cdot N \quad (4.28)$$

где $P_{уд}$ – удельная поверхностная мощность обогрева (приложение Ж), кВт/м²;
 f – удельная обогреваемая площадь, м².

Полученная таким образом мощность является исходной для электрического и конструктивного расчета электрообогреваемого пола.

Используя технические данные нагревательных проводов (приложение Б), определяют электрические параметры одного нагревательного элемента, включаемого на фазное напряжение.

По техническим характеристикам нагревательного провода находится максимальный допустимый ток одного нагревательного элемента:

$$I_{1max} = \sqrt{\frac{P_{лин}}{r_{лин}}} \quad (4.29)$$

где $P_{\text{лин}}$ – допустимая линейная мощность провода, Вт/м;
 $r_{\text{лин}}$ – линейное электрическое сопротивление, Ом/м.

Максимально допустимая мощность одного нагревательного элемента рассчитывается по формуле (4.30):

$$P_{1max} = I_{1max} \cdot U_{\phi} \quad (4.30)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, В.

Необходимое число нагревательных элементов составит:

$$z = \frac{P_{\text{м.о}}}{P_{1max}} \quad (4.31)$$

Принимается ближайшее большее целое (кратное трем) число нагревательных элементов ($z_{\text{пр}}$) для обеспечения симметрии трехфазной сети. Для принятого числа нагревательных элементов необходимо определить действительную рабочую мощность одного нагревательного элемента (4.32), удельную погонную мощность (4.34), его рабочий ток (4.33) и сопротивление (4.35):

$$P_1 = \frac{P_{\text{м.о}}}{z_{\text{пр}}}, \quad (4.32)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_{\phi}}, \quad (4.33)$$

$$P_{\text{пог}} = I_1^2 \cdot r_{\text{лин}}, \quad (4.34)$$

$$r_1 = \frac{U_{\phi}}{I_1} \quad (4.35)$$

Зная сопротивление нагревательного элемента, можно определить длину провода, необходимую для его выполнения, по формуле (4.36):

$$l_1 = \frac{r_1}{r_{\text{лин}}}, \quad (4.36)$$

Задачей конструктивного расчета электрообогреваемого пола является определение порядка размещения провода на заданных размерах обогревае-

мой площадки в животноводческом помещении. Площадки могут располагаться равномерно по всей площади помещения, если они используются для обогрева всех животных, или занимать какую-то часть помещения в случае обогрева части животных (больных, ослабленных и т. д.). На рисунке 4.7 приведен пример размещения электрообогреваемых площадок, на каждой из которых предполагается содержание двух животных.

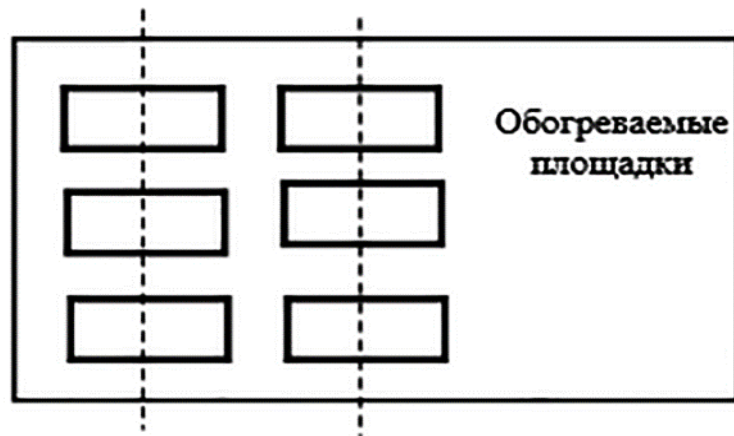


Рисунок 4.7 – Размещение электрообогреваемых площадок

Площадь одной обогреваемой площадки в общем случае составит:

$$F_{\text{пл}} = f \cdot N_1 \quad (4.37)$$

где f – удельная площадь обогрева на одно животное, м^2 ;

N_1 – число животных, содержащихся на одной площадке, гол.

Если размещение животных по проекту осуществляется без деления на группы, то принимается $N_1 = N$.

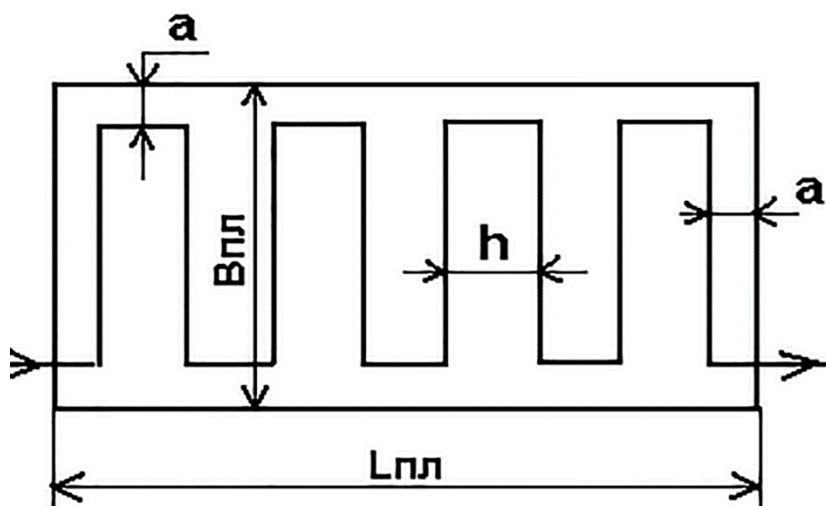
Мощность обогрева одной площадки определяется по формуле (4.38):

$$P_{\text{пл}} = P_{\text{уд}} \cdot F_{\text{пл}} \quad (4.38)$$

Мощность обогрева одной площадки должна быть обеспечена электрической мощностью нагревательного провода, уложенного на площадке. Исходя из этой мощности, определяется длина нагревательного провода, приходящегося на одну площадку:

$$l_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{пл}}}{P_{\text{пог}}}, \quad (4.39)$$

Этот провод с равномерным шагом должен быть уложен на обогреваемой площадке (рис. 4.8).



$B_{\text{пл}}$ – ширина площадки; $L_{\text{пл}}$ – длина площадки; h – шаг укладки; a – расстояние от края площадки до ближайших ниток провода (обычно принимается равным 5 см)

Рисунок 4.8 – План укладки нагревательного провода на площадке

Возможны и другие варианты укладки, однако во всех случаях необходимо обеспечивать равномерность. В задачу конструктивного расчета электрообогреваемой площадки входит определение шага укладки (h) и числа ниток провода, укладываемого на площадке (Z_{h1}). Из рисунка 4.8 видно, что общая длина провода на площадке будет равна сумме длин отдельных ниток плюс сумма длин участков провода в местах поворота (4.40):

$$l_{\text{пл}} = (B_{\text{пл}} - 2 \cdot a) \cdot Z_{h1} + L_{\text{пл}} \quad (4.40)$$

Отсюда число ниток провода составит:

$$Z_{h1} = \frac{l_{\text{пл}} - L_{\text{пл}}}{B_{\text{пл}} - 2 \cdot a} \quad (4.41)$$

Шаг укладки провода равен:

$$h = \frac{L_{\text{пл}} - 2 \cdot a}{Z_{h1} - 1} \quad (4.42)$$

Полученный шаг не должен быть больше допустимого по условию равномерности нагрева: в цыплятниках 5–10 см; в помещениях для содержания молодняка крупного рогатого скота и свиней – до 15 см; для взрослого поголовья – до 10 см.

Для разработки схемы включения нагревательных площадок необходимо определить их число, обогреваемое одним элементом, используя формулу (4.43):

$$n_1 = \frac{P_1}{P_{\text{пл}}} \quad (4.43)$$

Принимается ближайшее меньшее целое число. Излишек провода пойдет на соединение между площадками.

Схема включения нагревательных элементов определяется напряжением сети. При напряжении 380/220 В они соединяются в звезду, а при напряжении 220/127 В – в треугольник. Для примера на рисунке 4.9 приведена схема включения электрообогреваемого пола для следующих параметров: число площадок, подсоединяемых к одному нагревательному элементу $n_1 = 4$; принятое количество нагревательных элементов $z_{\text{пр}} = 6$ и напряжение сети $U = 380/220$ В. Общее число площадок равно 24. Они разделены на две группы по 12 штук, каждую из которых обогревает секция, состоящая из трех нагревательных элементов.

Для защиты животных от поражений электрическим током необходимо предусмотреть устройство выравнивания электрических потенциалов в виде экранной сетки. Исполнение теплого пола с нагревательным кабелем показано на рисунке 4.10.

Расчет установок местного обогрева с ИК-лампами. Алгоритм расчета рассматривается в разделе 7 учебного пособия.

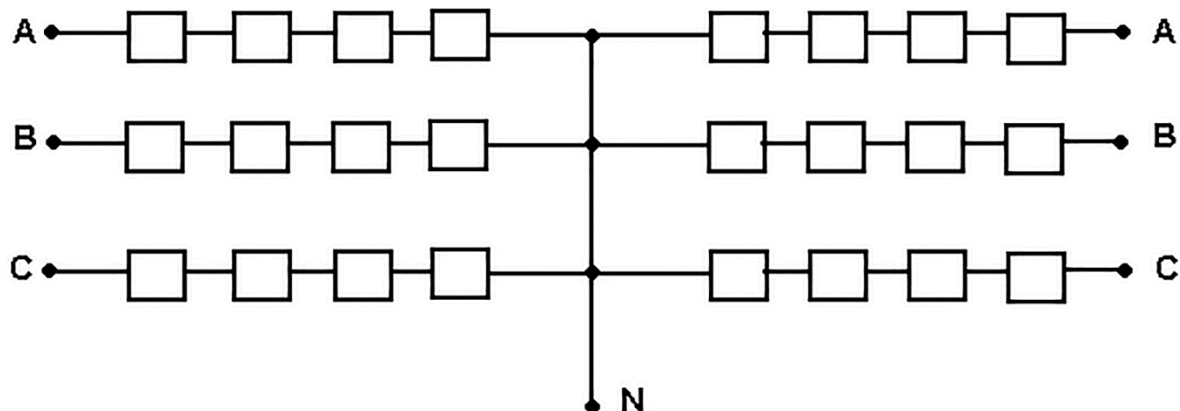


Рисунок 4.9 – Схема включения электрообогреваемых площадок



Рисунок 4.10 – Теплый пол в стяжку нагревательный кабель Тепло Софт Профи 80 м, 1200 Вт, с сенсорным терморегулятором 80м-1200/4

Пример. Рассчитайте нагревательную печь мощностью 15 кВт. Размеры печи соответствуют эскизу (рис. 4.11). Напряжение сети равно 380/220 В.

Решение: Приведенный коэффициент излучения изделия определяется по формуле (4.6):

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,7}{\frac{1}{c_{\text{н.т}}} + \left(\frac{1}{c_{\text{н}}} - 1\right)} = \frac{5,7}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 3,8$$

Удельная поверхностная мощность для идеального нагрева составит:

$$\Delta P_{\text{ид}} = c_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{H}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{H.Т}}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta P_{\text{ид}} = 3,8 \cdot \left[\left(\frac{1373}{100} \right)^4 - \left(\frac{593}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4} = 13,03 \text{ Вт/см}^2$$

T_{H} и $T_{\text{H.Т}}$ – абсолютные температуры нагревателя и нагреваемого тела, К.

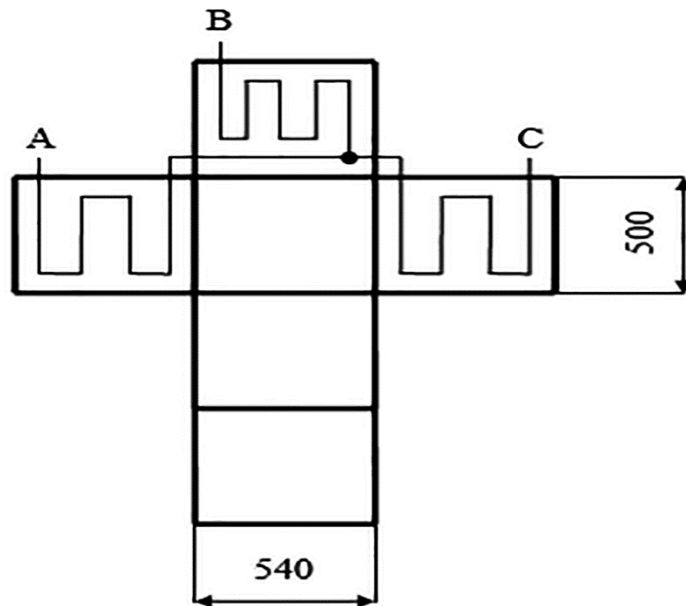


Рисунок 4.11 – Развертка нагревательной печи с изображением схемы подключения нагревательных элементов

Коэффициент, учитывающий неполное использование мощности нагревательных элементов, зависит от соотношения площадей нагреваемого тела ($F_{\text{H.Т}}$) и поверхности стен, занятой нагревателями ($F_{\text{СТ}}$):

$$F_{\text{СТ}} = [0,54 \cdot 0,5 + (0,5 \cdot 0,42) \cdot 2 + 0,42 \cdot 0,54] = 0,9168 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{H.Т}} = \pi \cdot d \cdot l \cdot n + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2 \cdot n =$$

$$= 3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,26 \cdot 9 + \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 2 \cdot 9 = 0,8761 \text{ м}^2$$

$$\text{Тогда } \frac{F_{\text{H.Т}}}{F_{\text{СТ}}} = \frac{0,8761}{0,9168} = 0,95$$

Так как соотношение больше 0,8, то $a_{\text{п}} = 1$.

Принимается конструкция нагревателей в виде проволочных спиралей, расположенных на полочках. Из таблицы 4.1 выбирается коэффициент эффективности системы для данной конструкции ($a_э = 0,32$).

Минимальное витковое расстояние $h/d = 3$. Коэффициент, учитывающий геометрию нагревателя ($a_г$), равен 1,4 (рис. 4.2).

Реальная удельная поверхностная мощность с учетом формулы (4.5) составит:

$$\Delta P_{\text{реал}} = 13,03 \cdot 1 \cdot 0,32 \cdot 1,4 \cdot 1 = 5,84 \text{ Вт/см}^2$$

Мощность одной фазы трехфазного нагревательного устройства равна:

$$P_{\phi} = \frac{P}{3} = \frac{15}{3} = 5 \text{ кВт}$$

Диаметр электрических нагревателей нихромовой проволоки при номинальном напряжении 380 В (предварительно) составит:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot \rho_n \cdot P_{\phi}^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot \Delta P_{\text{реал}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 1,15 \cdot 5}{3,14^2 \cdot 380^2 \cdot 5,84}} = 0,65 \text{ мм}$$

При этом удельное сопротивление материала провода (ρ_n) для нихрома принято равным 1,15 (Ом·мм²)/м.

Принимается диаметр проволоки $d = 1$ мм.

Сопротивление фазы нагрузки составит:

$$R_{\phi} = \frac{U^2}{10^3 \cdot P_{\phi}} = \frac{380^2}{10^3 \cdot 5} = 28,88 \text{ Ом}$$

Длина проволоки на фазу равна:

$$l_{\phi} = \frac{R_{\phi} \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho_n} = \frac{28,88 \cdot 3,14 \cdot 1^2}{1,15 \cdot 4} = 19,71 \text{ м}$$

Диаметр спирали при диаметре провода $d \leq 3$ мм будет составлять:

$$d_{\text{сп}} = d \cdot 10 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ мм}$$

Длина витка спирали равна:

$$l_{\text{в}} = \pi \cdot d_{\text{сп}} = 3,14 \cdot 10 = 31,4 \text{ мм}$$

Количество витков на одну фазу устройства составит:

$$n_{\text{в1}} = \frac{l_{\phi}}{l_{\text{в}}} = \frac{19710}{31,4} = 628 \text{ витков}$$

Шаг спирали определяется из принятого соотношения $h/d = 3$:

$$h_{\text{сп}} = 3 \cdot d = 3 \cdot 1 = 3 \text{ мм}$$

Длина спирали на одну фазу равна:

$$l_{\text{сп.1}} = n_{\text{в1}} \cdot h = 628 \cdot 3 = 1884 \text{ м}$$

Тогда общая длина спирали составит:

$$l_{\text{сп}} = l_{\text{сп.1}} \cdot 3 = 1,884 \cdot 3 = 5,652 \text{ м}$$

Такую длину нагревательных спиралей вполне возможно разместить по двум боковым и задней стенке печи.

Срок службы нагревательных элементов из нихрома:

$$\tau = d \cdot \tau'_{\text{пр}} \cdot K'$$

$\tau'_{\text{пр}}$ – срок службы нагревателя при диаметре провода $d = 1$ мм, ч.

Так как $d = 1$ мм, то:

$$\tau = \tau'_{\text{пр}} = 2000 \text{ ч}$$

при температуре нагрева 1100 °С; сплав марки Х15Н60К3.

Этот сплав позволяет увеличить срок службы при семичасовом рабочем дне до 285,2 дней, что примерно 0,75 года, тогда как при сплаве Х23Н18 срок службы равен 500 часов, что составляет всего 90 рабочих дней при семичасовом рабочем дне.

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитайте нагревательный элемент открытого типа, имеющий мощность нагрева $P = 2$ кВт; напряжение $U = 500$ В; рабочую температуру, равную $t_{\text{раб}} = 700$ °С, выполненный из нихрома марки Х20Н80 для работы в указанных условиях с коэффициентами монтажа $K_m = 0,4$ и среды $K_c = 4$.

2. Рассчитайте электрический нагреватель из нихромового провода для подогрева воздуха, поступающего в комнату через форточку, с тем, чтобы этот воздух имел комнатную температуру $t_{вн} = 24$ °С при наружной температуре, равной $t_{нар} =$ минус 12 °С. Кратность воздухообмена $K_0 = 2$ ч⁻¹ при объеме комнаты $V = 40$ м³. Нагреватель однофазный, напряжение сети $U = 220$ В. Расчет производится по таблицам нагрузок. Рабочая температура нагревателя составляет $t_{раб} = 600$ °С. Коэффициенты монтажа и среды $K_m = 0,5$; $K_c = 1,6$.

3. Рассчитайте нагревательный элемент аналитическим методом. Исходные данные: мощность нагревательного элемента $P = 1,8$ кВт; номинальное напряжение сети $U_n = 380$ В; допустимая поверхностная мощность нагревателя $\Delta P_{доп} = 4,5$ Вт/см² при температуре поверхности нагревателя $t_{доп} = 1\ 100$ °С. Рабочая температура нагревателя $t_{раб} = 800$ °С. Расчет выполните с учетом того, что действительная удельная поверхностная мощность определяется:

$$\Delta P_d = \Delta P_{доп} \cdot \left(\frac{t_{раб}}{t} \right)^2$$

4. Рассчитайте элементный нагреватель из предшествующей задачи графоаналитическим методом. Нагреватель предназначен для работы при условии $t_{раб} = t_{доп}$.

5. Рассчитайте электрический сушильный шкаф мощностью $P_n = 2,4$ кВт на напряжение $U_n = 220$ В. Требуемая температура нагрева воздуха $t_b = 140$ °С. Коэффициент теплоотдачи с поверхности зависит от скорости движения воздуха и определяется как $\alpha = \alpha_{см}(v/v_{ам})$, где v – скорость движения воздуха, м/с; $\alpha_{см} = 1\ 500$ Вт/(м²·°С) – коэффициент теплоотдачи при стандартной скорости, равной 6 м/с, $t_p = 700$ °С – рабочая температура нагревателя. Расчет выполните аналитическим методом. Допустимая температура нагрева для материала нагревательного элемента $t_{доп} = 1\ 200$ °С; материал – нихром Х20Н80. Нагреватель трехфазный.

6. Определите допустимую поверхностную мощность и рассчитайте электрический нагреватель аналитическим методом. Материал нагревательной спирали – тройной нихром Х15В60 с допустимой температурой нагрева, составляющей $t_{дон} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; удельным сопротивлением $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$; температурный коэффициент $\alpha_t = 16,3 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Допустимая поверхностная мощность идеализированного нагревателя $\Delta P_{дон(ид)} = 3\text{ Вт/см}^2$. Мощность нагревателя $P_n = 1,1\text{ кВт}$. Номинальное напряжение $U_n = 36\text{ В}$. Значения коэффициентов: $a_{\varepsilon} = 0,6$; $a_{\Gamma} = 0,85$; $a_P = 1,25$; $a_C = 1$.

7. Рассчитайте электрическую нагревательную установку с нагревателями из стали для электрообогреваемого пола свиноматочной фермы мощностью $P = 10\text{ кВт}$. Температура поверхностей нагревателей не должна превышать $t_{дон} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная поверхностная мощность пола $P_{yd} = 120\text{ Вт/м}^2$. Источником питания служит трансформатор с напряжением $U_2 = 36\text{ В}$. Нагреватели выполняются из стальных стержней диаметром 12 мм (табл. 4.6). Рассчитайте размеры и параметры одного нагревателя и их число на всю установку. Разработайте схему включения. Температура окружающей среды $t_o = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 4.6 – Номограммы для нагревателя из стали диаметром 12 мм

$I, \text{ А}$	40	80	120	160	200	240
$\Delta t_{пов}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	10	22	35	50	65	70
$U_{пог}, \text{ В/м}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
$\Delta P, \text{ Вт/см}^2$	0,013	0,052	0,117	0,208	0,33	0,468

8. Выберите наиболее подходящие для нагрева движущегося масла трубчатые нагревательные элементы (ТЭН) (приложение М) и рассчитайте электрическую нагревательную установку мощностью $P_{уст} = 9\text{ кВт}$ с числом регулировочных секций $n = 3$. Скорость движения воздуха $v = 6\text{ м/с}$. Максимальная температура нагрева $t_{max} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. По паспортным данным для выбранных ТЭН определите все параметры и удельную поверхностную мощность. Составьте

схему включения нагревателей. Установка должна быть трехфазной и симметричной. Напряжение сети 380/220 В.

9. Рассчитайте нагревательное устройство для предотвращения замерзания водопровода, установленного на открытой площадке, при температуре наружного воздуха $t_{нар} = \text{минус } 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагреватель должен быть выполнен из нагревательного провода в виде однослойной бифилярной обмотки, наматываемой на трубу в зоне промерзания, длиной $l = 1,5 \text{ м}$. Он защищается слоями тепло- и гидроизоляции, а также кожухом из жести для защиты от механических повреждений. Диаметр теплоотдающей поверхности составляет $D = 3 \cdot d$, где $d = 0,08 \text{ м}$ – диаметр трубы. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Температура воды в трубе $t_в = 6 \text{ }^\circ\text{C}$. Как изменится мощность и другие параметры, если обмотка будет выполнена не бифилярной? Напряжение питания устройства составляет $U = 220 \text{ В}$. Для расчета используйте нагревательный провод типа ПОСХВ.

10. Рассчитайте электрокалориферную установку с вентилятором для сушки одежды в неотапливаемом помещении. Температура воздуха в помещении составляет $t_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура воздуха, выходящего из калорифера, должна быть равна $t_{вых} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Подача вентилятора $L = 0,09 \text{ м}^3/\text{с}$. Провод нихромовый марки Х20Н80. Расчет оптимального диаметра провода ($d_{опт}$) выполните графоаналитическим методом:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{доп}}{d^{0,5}}$$

Установка является однофазной. Объемная теплоемкость воздуха составляет $c_v = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. Номинальное напряжение нагревателя $U_n = 220 \text{ В}$.

Контрольные вопросы

1. Какие основные преимущества косвенного (элементного) способа нагрева сопротивлением?
2. Какими основными свойствами должны обладать материалы, используемые для изготовления нагревательных элементов?
3. Какие преимущества имеют герметичные нагревательные элементы?
4. Как рассчитываются нагревательные элементы по таблице нагрузок?
5. Как устроены трубчатые нагревательные элементы (ТЭН)?
6. Какая максимальная температура поверхности ТЭН допускается в отопительных электрокалориферах?
7. С помощью каких технических характеристик нагревательных проводов производится расчет электронагревательных устройств?
8. Какие типы элементных водонагревателей используются в сельскохозяйственном производстве?
9. Как и в каких пределах регулируется мощность элементного водонагревателя?
10. Каковы основные преимущества проточных водонагревателей перед емкостными?
11. Каковы требования, предъявляемые к материалам наполнителя ТЭН?
12. С какой целью выполняется устройство выравнивания электрических потенциалов при сооружении электрообогреваемого пола?
13. По каким критериям определяется диаметр нихромового провода в таблице нагрузок?
14. В чем заключается суть графоаналитического метода расчета нагревательных элементов?
15. Дайте пояснения к принципиальной электрической схеме управления электрокалориферной установкой.

5 УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Индукционный нагрев осуществляется в переменном магнитном поле. Проводники, помещенные в поле, нагреваются в соответствии с законом Джоуля-Ленца вихревыми токами, наводимыми в них по законам электромагнитной индукции.

Индукционные нагревательные установки (ИНУ) осуществляют как прямой (рис. 5.1), так и косвенный (рис. 5.2) нагрев.

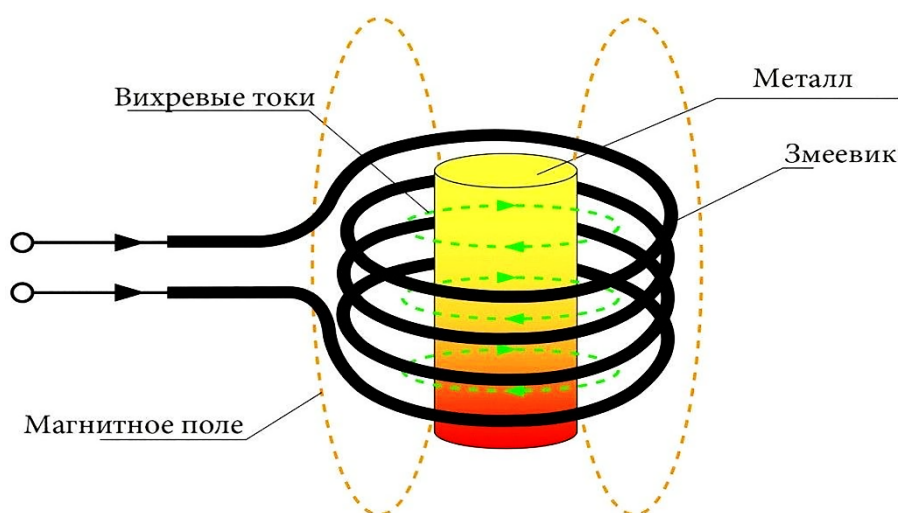


Рисунок 5.1 – Прямой нагрев материала (металлической заготовки, помещенной внутрь индуктора) в ИНУ

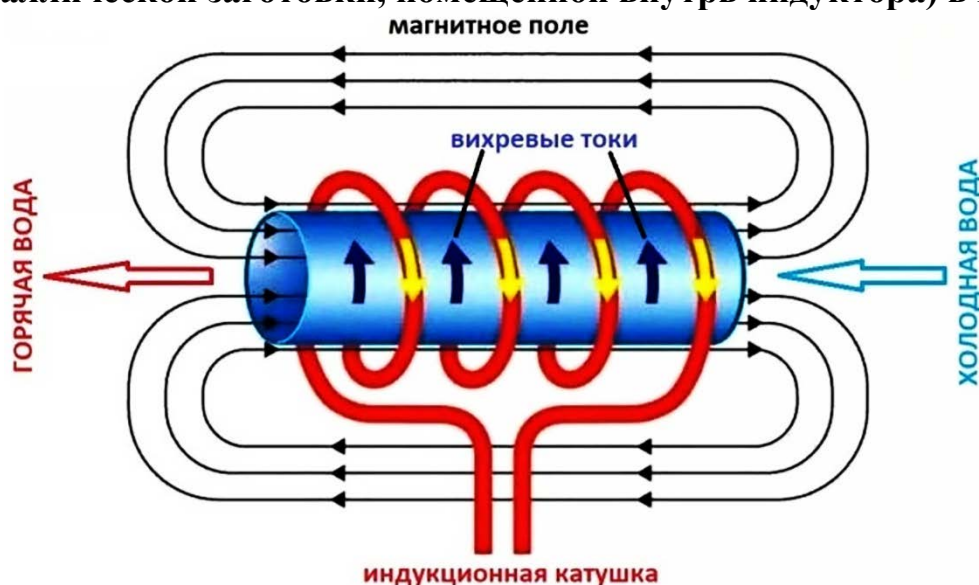


Рисунок 5.2 – Косвенный нагрев материала (воды, пропускаемой по металлической трубе, помещенной внутрь индуктора) в ИНУ

При проникновении в материал, помещенный внутрь индуктора, электромагнитная волна затухает. Глубина проникновения электромагнитной волны в металл определяется по формуле (5.1):

$$Z_a = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (5.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м;

μ – относительная магнитная проницаемость материала;

f – частота тока (электромагнитной волны), Гц.

Глубина проникновения электромагнитной волны в материал – это расстояние от поверхности вглубь проводника, на котором амплитуда электромагнитной волны затухает в число «е» (основание натурального логарифма) раз.

Излучаемая индуктором электромагнитная волна падает на металлическое тело и, поглощаясь в нем, вызывает нагрев. Мощность потока энергии, протекающего через единицу поверхности тела, представляет собой удельную поверхностную мощность, определяемую выражением (5.2):

$$\Delta P = 2 \cdot \pi \cdot J^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \quad (5.2)$$

где J – плотность тока, А/м;

$\sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f}$ – коэффициент поглощения мощности в материале (K_n).

Индукционные нагревательные установки классифицируются по частоте питающей сети на три вида:

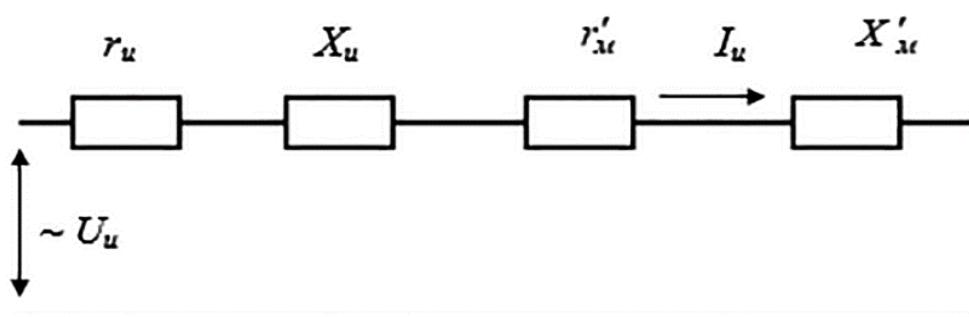
1. ИНУ низкой (промышленной) частоты.
2. ИНУ средней частоты.
3. ИНУ высокой частоты.

Изменяя частоту питающей сети, в индукционной нагревательной установке можно осуществить **различные режимы нагрева: сквозной; глубокий; поверхностный.**

5.1 Расчет индукционных нагревательных установок промышленной частоты

Индукционная нагревательная установка низкой (промышленной) частоты представляет собой воздушный трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания: первичная обмотка – индуктор с числом витков ($\omega_{\text{и}}$); вторичная – нагреваемый материал с числом витков ($\omega_{\text{м}} = 1$).

В задачу расчета индукционных нагревательных установок входит определение параметров схемы замещения (рис. 5.3), составленной исходя из того, что индукционная установка промышленной частоты представляет собой воздушный трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания.



**Рисунок 5.3 – Схема замещения индукционной
нагревательной установки промышленной частоты**

Параметры нагреваемых деталей в переменном магнитном поле:

1) активное сопротивление вихревым токам:

$$r_{\text{м}} = \rho_{\text{м}} \cdot \frac{l_{\text{в.т}}}{F_{\text{в.т}}} \quad (5.3)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – удельное сопротивление материала, Ом·м;

$l_{\text{в.т}}$ – длина пути вихревых токов по поверхности детали, м;

$F_{\text{в.т}}$ – площадь поперечного сечения вихревых токов, м².

2) индуктивное сопротивление детали вихревым токам:

$$X_{\text{м}} = \omega \cdot L_{\text{м}} \quad (5.4)$$

где ω – угловая частота электромагнитной волны, с⁻¹;

L_M – индуктивность соленоида, образованного вихревыми токами, Гн.

Индуктивность соленоида, образуемого вихревыми токами составит:

$$L_M = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot F'_M \cdot w_M^2}{h} \cdot K_C \quad (5.5)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала;

μ_0 – магнитная постоянная ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

F'_M – площадь поперечного сечения магнитного потока в нагреваемой детали, м²;

w_M^2 – число витков ленты нагрева, образованной в детали вихревыми токами;

h – высота нагреваемой детали в магнитном поле, м;

K_C – коэффициент соленоида, образованного вихревыми токами, зависящий от отношения диаметра нагреваемого цилиндра к его длине ($K_C \geq 1$).

Параметры индуктора:

1) активное сопротивление:

$$r_{и} = \rho_{и} \cdot \frac{l_{пр}}{F_{пр}} \quad (5.6)$$

где $\rho_{и}$ – удельное сопротивление провода индуктора, Ом·м;

$l_{пр}$ – длина индуктирующего элемента (провода), м;

$F_{пр}$ – площадь поперечного сечения индуктирующего элемента (провода), м².

2) индуктивное сопротивление:

$$X_{и} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot F'_{и} \cdot \omega_{и}^2}{h_{и}} \cdot K_{и} \quad (5.7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

$F'_{и}$ – площадь сечения зазора между индуктором и нагреваемой деталью, м²;

$\omega_{и}$ – число витков индуктора;

$h_{и}$ – высота индуктора, м;

$K_{и}$ – коэффициент соленоида, образованного индуктором.

Алгоритм расчета индукторов промышленной частоты. Определяются электрические параметры нагреваемого материала по формулам (5.3) и (5.4), а также полное сопротивление материала (z_M):

$$z_M = \sqrt{r_M^2 + x_M^2} \quad (5.8)$$

Действующее значение вихревого тока в нагреваемом теле составит:

$$I_{\text{в}} = \sqrt{\frac{P_{\text{тр}}}{r_{\text{м}}}} \quad (5.9)$$

где $P_{\text{тр}}$ – требуемая мощность нагрева, которую необходимо выделить в нагреваемой детали, Вт (определяется на основе уравнения теплового баланса).

Электродвижущая сила (ЭДС), обеспечивающая протекание требуемого вихревого тока, (удельная ЭДС, приходящаяся на один виток) равна:

$$e = I_{\text{в}} \cdot z_{\text{м}} \quad (5.10)$$

Ориентировочное число витков обмотки индуктора составит:

$$\omega_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{e} \quad (5.11)$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение индуктора, В.

Ток индуктора (ориентировочный) составит:

$$I_{\text{и}} = \frac{I_{\text{в}}}{\omega_{\text{и}}} \quad (5.12)$$

Сечение провода индуктора по условиям нагрева равно:

$$F_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{и}}}{j_{\text{доп}}} \quad (5.13)$$

где $j_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока для материала индуктирующего элемента, А/мм² (для медного проводника составляет 5 А/мм²).

Сечение провода выбирается по рассчитанному значению из ряда стандартных сечений проводников. Чаще всего индуктирующий элемент выполняется из меди, реже – из алюминия.

Длину провода индуктора рассчитывают по формуле (5.14):

$$l_{\text{пр}} = l_{\text{вит}} \cdot \omega_{\text{и}} \quad (5.14)$$

где $l_{\text{вит}}$ – длина провода одного витка обмотки, м.

При известном межвитковом расстоянии (h), которое определяется по высоте индуктора и длине индуктирующего элемента, длина одного витка определяется по формуле (5.15):

$$l_{\text{вит}} = \sqrt{(\pi \cdot D_{\text{и}})^2 + h^2} \quad (5.15)$$

где $D_{\text{и}}$ – диаметр индуктора, м.

Принимая величину воздушного зазора между нагреваемым телом и индуктором $a = 0,005$ м, рассчитывают диаметр индуктора из выражения (5.16):

$$D_{\text{и}} = d + 2 \cdot a + 2 \cdot d_{\text{пр}} \quad (5.16)$$

где d – диаметр нагреваемой детали круглого сечения, м;

$d_{\text{пр}}$ – диаметр провода индуктора, м (определяется по известному сечению индуктирующего элемента).

Определяются параметры $r_{\text{и}}, X_{\text{и}}, z_{\text{и}}$ обмотки индуктора по соотношениям (5.6) и (5.7).

Исходя из теории воздушного трансформатора, определяются приведенные параметры нагреваемого материала (детали):

$$r_{\text{м}}' = r_{\text{м}} \cdot \omega_{\text{и}}^2; X_{\text{м}}' = X_{\text{м}} \cdot \omega_{\text{и}}^2 \quad (5.17)$$

Действительный ток в индукторе находим из выражения (5.18):

$$I_{\text{и(д)}} = \frac{U_{\text{и}}}{\sqrt{(X_{\text{и}} + X_{\text{м}}')^2 + (r_{\text{и}} + r_{\text{м}}')^2}} \quad (5.18)$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение индуктора, В.

Коэффициент мощности индукционной нагревательной установки определяем по формуле (5.19):

$$\cos \varphi = \frac{r_{\text{и}} + r_{\text{м}}'}{\sqrt{(X_{\text{и}} + X_{\text{м}}')^2 + (r_{\text{и}} + r_{\text{м}}')^2}} \quad (5.19)$$

Из выражения (5.19) видно, что максимальное значение коэффициент мощности будет принимать при соотношении параметров системы «деталь –

индуктор» ($X = r$), то есть максимальный теоретически возможный коэффициент мощности индукционной нагревательной установки составит 0,707.

Коэффициент полезного действия индукционной нагревательной установки находим из выражения (5.20):

$$\eta = \frac{r'_M}{r'_I + r'_M} \quad (5.20)$$

5.2 Расчет индукционных нагревательных установок средней и высокой частоты

К индукционным нагревательным установкам средней частоты относятся установки, работающие в диапазоне частот от 150 до 10 000 Гц; к индукционным нагревательным установкам высокой частоты – более 10 кГц.

Выбор генератора ВЧИ производится по номограммам удельной поверхностной мощности (ΔP) индукционного нагрева в зависимости от предполагаемого графика подвода мощности в функции толщины закаливаемого слоя (δ) (рис. 5.4).

Определяется средняя мощность, выделяющаяся в нагреваемой детали:

$$P_{\text{ср}} = \Delta P \cdot F_3 \quad (5.21)$$

где ΔP – принятое по номограммам оптимальное значение удельной поверхностной мощности, Вт/см²;

F_3 – площадь поверхности, подвергающаяся одновременному нагреву, закаливанию, см².

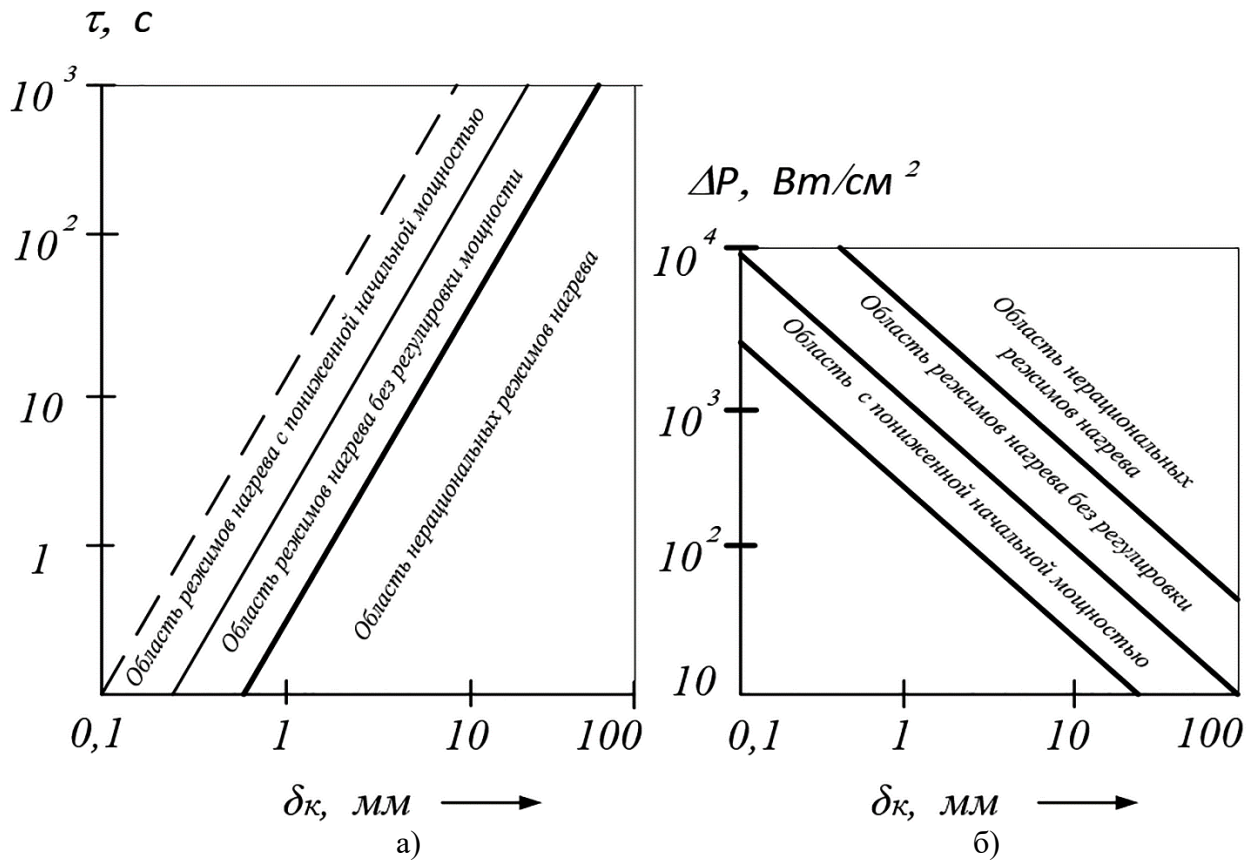
Мощность, потребляемая генератором из сети, рассчитывается по формуле (5.22):

$$P_{\Gamma} = \frac{P_{\text{ср}}}{\eta_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\Gamma}} \quad (5.22)$$

где $\eta_{\text{и}}$ – КПД индуктора (обычно принимается равным 0,4–0,8 в зависимости от диаметра нагреваемых заготовок);

$\eta_{\text{тр}}$ – КПД воздушного трансформатора (равен 0,7–0,9);

$\eta_{\text{г}}$ – КПД ВЧИ генератора (равен 0,7).



а) зависимость длительности нагрева (τ) от толщины закаливаемого слоя (δ);

б) зависимость средней удельной поверхностной мощности (ΔP) от толщины закаливаемого слоя (δ)

Рисунок 5.4 – Номограммы для определения удельной поверхностной мощности нагрева в ИНУ

Выбор оптимальной частоты производится по двум условиям:

1) условие обеспечения высокого КПД, которому соответствует соотношение $\frac{R}{z_a} \geq (5 \dots 10)$:

$$f = 6 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_m}{\mu \cdot R^2} \quad (5.23)$$

где ρ_m – удельное сопротивление материала нагреваемой детали, Ом·м;

μ – относительная магнитная проницаемость материала;

R – радиус цилиндрической детали, м.

2) по необходимой толщине закаленного слоя (δ_k), в соответствии с чем должно соблюдаться условие $z_a = \delta_k$:

$$f = 2,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\rho_M}{\delta_K^2} \quad (5.24)$$

Эмпирические формулы, используемые на практике для определения частоты, представлены выражениями (5.25)–(5.27):

1) для деталей простейшей формы:

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{\delta_K^2} \quad (5.25)$$

2) для деталей сложной формы:

$$f = \frac{5 \cdot 10^5}{\delta_K^2} \quad (5.26)$$

3) для сквозного нагрева цилиндрических деталей диаметром d :

$$f = \frac{3 \cdot 10^6}{d^2} \quad (5.27)$$

В эмпирических формулах δ_K и d следует выражать в миллиметрах.

Частота выбирается как наиболее ближайшая большая из разрешенных в технике (приложение П). Источник питания, то есть высокочастотный генератор, выбирается из приложения П.

Расчет индуктора начинается с определения длины ленты индуктора:

$$l_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot a \cdot K_{\text{и}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{п}}}{\Delta P_{\text{опт}} \cdot 503}} \quad (5.28)$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение на индукторе, В;

a – воздушный зазор между деталью и лентой индуктора, м;

$K_{\text{и}}$ – соленоидный коэффициент индуктора.

Ширина ленты индуктора находится по формуле (5.29):

$$b_{\text{и}} = \frac{F_3}{l_{\text{и}}} \quad (5.29)$$

Прочие конструктивные размеры рассчитываются, исходя из размеров и формы нагреваемой детали.

Размеры индуктора описываются следующим параметром:

$$al = 1,78 \cdot 10^5 \cdot U_{\text{и}} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot (\rho \cdot \mu)^{\frac{1}{4}} \cdot f^{-\frac{3}{4}} \quad (5.30)$$

Для углеродистой стали в холодном состоянии: $\rho = 10^{-5}$ Ом·см, $\mu = 100$; в нагретом до температуры 800 °С состоянии: $\rho = 10^{-4}$ Ом·см, $\mu = 1$. Тогда имеем следующие формулы расчета параметра al :

1) для холодного состояния:

$$al = 3,18 \cdot 10^4 \cdot U_{\text{и}} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot f^{-\frac{3}{4}} \quad (5.31)$$

2) для нагретого состояния:

$$al = 1,78 \cdot 10^4 \cdot U_{\text{и}} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot f^{-\frac{3}{4}} \quad (5.32)$$

К показателям экономичности установок относятся:

1) коэффициент полезного действия ВЧИ нагрева:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{м}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{\rho_{\text{м}} \cdot \mu_{\text{м}}}}}, \quad (5.33)$$

$$\eta_{\text{иmax}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{\rho_{\text{м}} \cdot \mu_{\text{м}}}}} \quad (5.34)$$

где $R_{\text{и}}$ – радиус индуктора, м;

$R_{\text{м}}$ – радиус нагреваемой детали, м;

$\rho_{\text{и}}$ – удельное сопротивление материала индуктора, Ом·м;

$\rho_{\text{м}}$ – удельное сопротивление материала нагреваемой детали, Ом·м;

$\mu_{\text{м}}$ – относительная магнитная проницаемость материала детали.

2) коэффициент мощности индукционных нагревательных установок средней и высокой частот:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{a \cdot \sqrt{2}}{z_a \cdot \mu_a}\right)^2}} \quad (5.35)$$

где a – воздушный зазор, м;

z_a – глубина проникновения электромагнитной волны в материал, м;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

Так как коэффициент мощности индукционных нагревательных установок низок, а в процессе нагрева он может снизиться до уровня 0,01–0,1, устанавливают компенсирующее устройство, емкость конденсаторов которого рассчитывают по формуле (5.36):

$$C = \frac{P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\text{н}}^2} \quad (5.36)$$

где P – активная мощность индуктора, Вт;

φ_1 и φ_2 – угол сдвига между током и напряжением до и после компенсации.

Пример. Рассчитайте индуктор и выберите высокочастотную установку для поверхностной закалки цилиндрических заготовок из углеродистой стали диаметром $d = 30$ мм и высотой $h = 90$ мм. Глубина закаливаемого слоя составляет $\delta_k = 1$ мм, напряжение на индукторе $U_u = 100$ В.

Решение: Рекомендуемая частота составит:

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{\delta_k^2} = \frac{5 \cdot 10^4}{1^2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$

Ближайшая из применяемых в технике частот равна 67 кГц.

По номограмме (рис. 5.4) выбирается оптимальная удельная поверхностная мощность (ΔP), равная 400 Вт/см².

Находится параметр al по формуле (5.31) для холодного состояния:

$$al = 3,18 \cdot 10^4 \cdot \frac{100}{\sqrt{400}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{(67 \cdot 10^3)^3}} = 38,2 \text{ см}^2$$

Величина воздушного зазора принимается $a = 0,5$ см, тогда диаметр индуктора составит:

$$D_{\text{и}} = 3 + 2 \cdot 0,5 = 4 \text{ см}$$

Длина индуктирующего элемента равна:

$$l_{\text{и}} = \frac{38,2}{0,5} = 76,4 \text{ см}$$

Число витков индуктора равно:

$$\omega_{\text{и}} = \frac{l_{\text{и}}}{\pi \cdot D_{\text{и}}} = \frac{76,4}{3,14 \cdot 4} = 6$$

Высота индуктора составит:

$$h_{\text{и}} = (1 \dots 1,2) \cdot 9 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

Колебательная мощность генератора составит:

$$P_{\Gamma} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot d \cdot h_{\text{и}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{тр}}} = \frac{400 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{0,66 \cdot 0,88} = 64,8 \text{ кВт}$$

Выбираем высокочастотную установку типа ЛПЗ-2-67М, имеющую колебательную мощность 63 кВт и рабочую частоту 67 кГц.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите глубину проникновения электромагнитной волны в металл и удельную поверхностную мощность индукционного нагрева, если известны удельное сопротивление $\rho_m = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и относительная магнитная проницаемость материала $\mu_m = 100$; частота тока $f = 1$ кГц и его настил на поверхности детали $J = 1\,000$ А/м. Рассчитайте эти же величины при изменении частоты тока в пределах от $(0,1-10) \cdot f$. Определите мощность, выделяющуюся в детали при частоте f , если площадь нагреваемой поверхности $F_m = 200$ см².

2. Определите сопротивление стальной цилиндрической детали диаметром $d = 0,02$ м и длиной $l = 3$ м переменному току частотой $f = 10$ кГц, а также сопротивление этой же детали вихревым токам, возбуждаемым в ней соленоид-

ным индуктором той же длины l . Начальная температура детали $t_1 = 20$ °С; конечная $t_2 = 500$ °С. Температурный коэффициент сопротивления $\alpha_t = 0,004$ °С⁻¹, магнитная проницаемость $\mu = 1\ 000$. Удельное сопротивление материала при температуре 20 °С составляет $\rho_{20} = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

3. Определите сопротивление детали, имеющей сечение квадратной формы со стороной a и длиной $l = 2,5$ м, переменному току частотой $f = 8$ кГц, если известно удельное сопротивление материала детали $\rho_{20} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; температурный коэффициент $\alpha_t = 0,005$ °С⁻¹; магнитная проницаемость $\mu = 900$; температура детали $t_1 = 20$ °С ($t_1 = t_2$) и температура Кюри для материала детали $t_k = 770$ °С.

4. Определите удельные поверхностные мощности, выделившиеся на поверхностях индуктора (медная лента) и стальной детали, при одинаковом настиле токов и температуре детали $t = 1\ 000$ °С, частоте $f = 1\ 000$ Гц. Определите КПД индуктора. Удельное сопротивление и магнитная проницаемость стали составляют $\rho_{ст} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и $\mu_{ст} = 100$; настил тока $J = 1000$ А/м; температура Кюри $t_k = 780$ °С; удельное сопротивление меди $\rho_{меди} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

5. Определите сопротивление стальной ленты длиной $l = 0,5$ м переменному току частотой $f = 50$ Гц, имеющую ширину $b = 3$ м и толщину $\delta = 2$ мм, если температурный коэффициент составляет $\alpha_t = 0,007$ °С⁻¹; удельное сопротивление $\rho_{20} = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; относительная магнитная проницаемость $\mu = 100$. Определите сопротивление этой же ленты вихревым токам, возбуждаемым в ней односторонним индуктором. Температура нагрева ленты $t = 100$ °С.

6. Рассчитайте ИНУ промышленной частоты, представляющую собой трубу из стали с диаметром $d = 0,05$ м, толщиной стенки $\delta = 2,5$ мм, удельным сопротивлением $\rho_{20} = 0,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, относительной магнитной проницаемостью $\mu = 100$, через которую подается вода с начальной температурой $t_1 = 2$ °С, нагреваемая до температуры $t_2 = 50$ °С, при подаче $m' = 50$ кг/ч. Допустимая

плотность тока в индукторе $j_{дон} = 5 \text{ А/мм}^2$. Постройте схему замещения и векторную диаграмму ИНУ. Термический КПД установки $\eta_m = 0,6$. Длина трубы, на которой выполнена намотка индуктора, $h_u = 1 \text{ м}$.

7. Определите сопротивление стальной трубы длиной $l = 0,5 \text{ м}$ и диаметрами (наружным $d_{вн} = 0,2 \text{ м}$ и внутренним $d_{нар} = 0,21 \text{ м}$) переменному току частотой $f = 500 \text{ Гц}$, если ее удельное сопротивление $\rho_{20} = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; температурный коэффициент $\alpha_t = 0,004 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; относительная магнитная проницаемость $\mu = 600$; температура $t = 1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите сопротивление той же трубы вихревым токам, возбуждаемым в ней соленоидным индуктором. Температура Кюри $t_k = 720 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Индукционная нагревательная установка, выполненная в виде однослойной обмотки, наложена на водопроводную трубу диаметром $d = 0,04 \text{ м}$. Толщина стенки трубы $\delta = 2 \text{ мм}$. Воздушный зазор между трубой и обмоткой принять $a = 1 \text{ мм}$. Число витков обмотки $\omega_u = 200$. Напряжение питания составляет $U = 220 \text{ В}$. Металл трубы имеет удельное сопротивление, соответствующее $\rho_{20} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; относительная магнитная проницаемость $\mu = 250$. Частота питающего тока $f = 50 \text{ Гц}$. Определите, при какой подаче вода будет нагреваться на $\Delta t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, если известен КПД установки $\eta_m = 0,85$. Плотность тока обмотке $j = 7,5 \text{ А/мм}^2$. Постройте векторную диаграмму.

9. Определите сопротивление детали сложной формы, но постоянного по длине $l = 0,2 \text{ м}$ поперечного сечения. Периметр поперечного сечения детали составляет $L = 0,09 \text{ м}$; удельное сопротивление $\rho_{20} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; относительная магнитная проницаемость $\mu = 100$; температурный коэффициент принять равным $\alpha_t = 0,004 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Частота переменного тока $f = 10\ 000 \text{ Гц}$. Температура детали $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Все размеры детали во много раз больше глубины проникновения электромагнитной волны в материал Z_a . Определите сопротивление той же детали вихревым токам, возбуждаемым в ней соленоидным индуктором.

10. Рассчитайте ИНУ высокой частоты для закалки стальных деталей диаметром $d = 0,02$ м при толщине закаливаемого слоя $X_k = 0,1$ мм. Выберите генератор ВЧИ. Площадь одновременно закаливаемой поверхности $F_3 = 10$ см². График подвода мощности – для генераторов с саморегулированием. Напряжение индуктора $U_u = 50$ В. Выбор частоты осуществите по следующему условию получения $Z_a = X_k = 0,1$ мм. КПД системы «деталь – индуктор – ВЧ-трансформатор» $\eta = 0,7$; генератора $\eta_g = 0,7$. Воздушный зазор примите равным $a = 5$ мм.

11. Определите активное сопротивление детали, подвергающейся поверхностной закалке в соленоидном индукторе с длиной ленты $l_u = 0,8$ м и шириной ленты $b_u = 4$ мм, если частота тока $f = 10$ кГц; удельное сопротивление равно $\rho_{20} = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; температурный коэффициент сопротивления $\alpha_t = 0,004$ °С⁻¹, относительная магнитная проницаемость $\mu = 100$. Температура детали составляет $t = 1\ 000$ °С. Диаметр индуктора и детали неизвестны, воздушный зазор между ними принимается $a = 5$ мм. Определите активное сопротивление индуктора и коэффициент мощности. Температура Кюри $t_k = 850$ °С.

12. Рассчитайте индуктор для ВЧ поверхностной закалки цилиндрических деталей диаметром $d = 0,1$ м. Удельное сопротивление материала составляет $\rho_{20} = 1,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; магнитная проницаемость $\mu = 100$; требуемая толщина закаливаемого слоя $X_k = 5$ мм. Частоту выберите, используя следующие условия: $X_k = Z_a$ и $R/Z_a = 10$. Воздушный зазор $a = 3$ мм. Напряжение на индукторе $U_u = 100$ В. Определите площадь одновременно закаливаемой поверхности F_3 , если известна потребляемая индуктором мощность $P_u = 20$ кВт.

13. Рассчитайте и постройте зависимости КПД и $\cos\varphi$ индуктора от величины воздушного зазора a для значений: удельного сопротивления материала детали $\rho_m = 1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; относительной магнитной проницаемости $\mu = 300$; удельного сопротивления материала индуктора $\rho_u = 0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Диаметр индуктора $d_u = 0,1$ м. Шаг изменения воздушного зазора $\Delta a = 5$ мм. Частота тока индуктора $f = 10$ кГц.

14. Индуктор ВЧ закалочной установки с числом витков $\omega_n = 3$ выполнен из медной прямоугольной трубки, ширина которой $b = 3$ мм. Напряжение на индукторе $U_n = 50$ В и настил тока в детали $J = 7,5$ А/м. Относительная магнитная проницаемость $\mu_n = 300$. Удельное сопротивление материала детали составляет $\rho_n = 1,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Рабочая частота индуктора $f = 440$ кГц. Определите мощность, выделяющуюся в детали; мощность, выделяющуюся в индукторе; необходимую подачу охлаждающейся воды m' , если она поступает с температурой $t_1 = 5$ °С, а на выходе индуктора $t_2 = 70$ °С. Определите КПД и $\cos\varphi$. Потерями теплоты от индуктора в окружающую среду пренебречь.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия установок индукционного нагрева?
2. Почему электрический КПД установок индукционного нагрева достаточно низок?
3. Как можно увеличить коэффициент мощности индукционного нагревателя?
4. Для каких тепловых процессов перспективно использование токов высокой частоты в сельском хозяйстве?
5. От чего зависит глубина проникновения электромагнитной волны в материал?
6. На какие три группы классифицируются индукционные нагревательные установки и по какому признаку?
7. Какие условия определяют выбор оптимальной частоты для закалки деталей?
8. Перечислите режимы нагрева в индукционных нагревателях.
9. Какие основные элементы входят в комплект высокочастотных закалочных установок и каково их назначение?
10. От каких параметров зависит коэффициент полезного действия установок индукционного нагрева?

6 УСТАНОВКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Диэлектрический нагрев – нагрев диэлектриков и полупроводников в переменном электрическом поле, под действием которого нагреваемый материал поляризуется. Диэлектрический нагрев применяется для сушки и нагрева материалов с низкой теплопроводностью: фрукты, овощи, чай, табак, зерновые культуры и др. При этом нагреваемый материал помещается между обкладками высокочастотного конденсатора, то есть камерой нагрева является рабочий конденсатор.

Классифицируются установки диэлектрического нагрева по частоте питающей сети на четыре группы:

1) *установки низкой частоты* с частотой от 0,5 до 10 МГц, в которых осуществляется нагрев полярных диэлектриков;

2) *установки средней частоты* с частотой от 10 до 100 МГц, в которых осуществляется нагрев полярных и неполярных диэлектриков;

3) *установки высокой частоты* с частотой от 100 до 300 МГц, в которых осуществляется нагрев неполярных диэлектриков (поляризация не происходит);

4) *установки сверхвысокой частоты* с частотой более 300 МГц, в которых осуществляется нагрев неполярных диэлектриков (поляризация не происходит).

Установки диэлектрического нагрева характеризуются **удельной объемной мощностью**, то есть мощностью, выделяемой в единице объема нагреваемого материала, которая определяется выражениями (6.1), (6.2):

$$\Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta, \quad (6.1)$$

$$\text{или } \Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot K_{\Pi} \quad (6.2)$$

где E – напряженность электрического поля в диэлектрике, В/м;

f – частота электрического поля, Гц;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого материала;

K_{Π} – коэффициент поглощения мощности материалом (фактор потерь диэлектрика).

Коэффициент поглощения мощности материалом составляет:

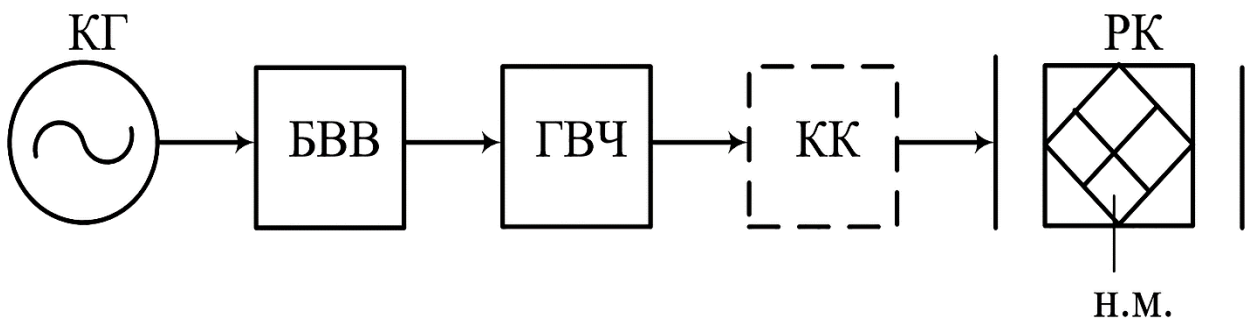
$$K_{\Pi} = \varepsilon \cdot \tan \delta \quad (6.3)$$

Увеличить удельную объемную мощность установки диэлектрического нагрева возможно следующими способами:

1) увеличивая напряженность электрического поля (E), которая ограничивается значением напряженности пробоя ($E_{\text{пр}}$), при достижении которой происходит электрический пробой нагреваемого диэлектрика;

2) увеличивая частоту питающей сети (f), которая ограничивается значением граничной (критической) частоты (f), при которой в нагреваемом диэлектрике начинает проявляться поверхностный эффект, заключающийся в затухании удельной объемной мощности нагрева от внутренних слоев материала к наружным.

Структурная схема установки диэлектрического нагрева представлена на рисунке 6.1.



КГ – источник питания; БВВ – блок высоковольтного выпрямления;

ГВЧ – генератор высоких частот; КК – колебательный контур;

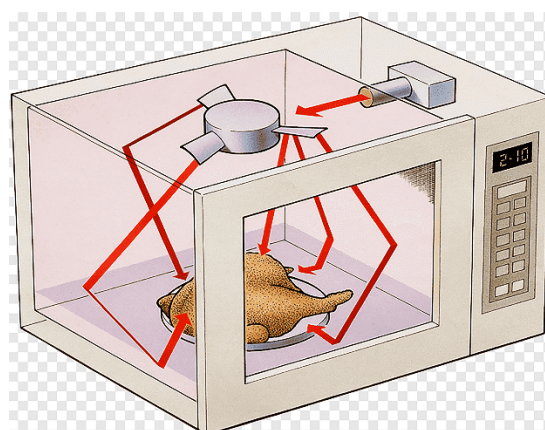
РК – рабочий конденсатор; н. м. – нагреваемый материал

Рисунок 6.1 – Структурная схема установки диэлектрического нагрева

Примеры практического применения диэлектрического нагрева приведены на рисунке 6.2.



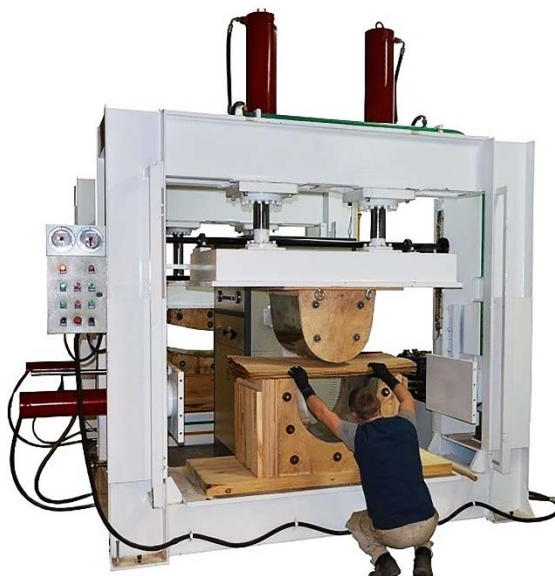
а)



б)



в)



г)

а) установка сушки древесины; б) установка приготовления пищи;
в) дефростер конвейерного типа; г) ТВЧ пресс для склеивания фанеры
Рисунок 6.2 – Установки диэлектрического нагрева

6.1 Расчет установок

Параметры схемы замещения установки диэлектрического нагрева:

1) емкостное сопротивление плоского рабочего конденсатора:

$$X_K = \frac{1}{\omega \cdot C_K} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot F} \quad (6.4)$$

где ω – угловая частота переменного электрического поля, c^{-1} ;

C_K – емкость конденсатора (воздушного), Ф;

l – расстояние между обкладками конденсатора, м;
 ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
 F – площадь обкладки конденсатора, м².

2) емкостное сопротивление, вносимое нагреваемым материалом:

$$X_M = \frac{1}{\omega \cdot C_M} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\varepsilon - 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot F} \quad (6.5)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала.

3) активное сопротивление материала, определяемое по выделению теплоты в материале:

$$r_M = 1,8 \cdot 10^{10} \cdot \frac{l}{K_{II} \cdot f \cdot F} \quad (6.6)$$

Общая емкость установки диэлектрического нагрева составит:

$$C_y = C_K + C_M = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{l}{F} \quad (6.7)$$

Критическая частота при диэлектрическом нагреве материалов, при которой происходит срыв колебаний и снижение мощности нагрева, равна:

$$f_0 = \frac{k \cdot T}{8 \cdot \pi^2 \cdot R^3 \cdot \xi} \quad (6.8)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
 T – абсолютная температура нагрева, К;
 R – радиус полярной молекулы, м;
 ξ – абсолютная вязкость материала, кг/(м·с).

Выбор напряженности электрического поля (E) производится с учетом значения напряженности электрического пробоя ($E_{пр}$) диэлектрика:

$$E = \frac{E_{пр}}{1,5 \dots 2} \quad (6.9)$$

Мощность преобразователя частоты определяется с учетом допустимой объемной мощности при ограничении скорости нагрева:

$$\Delta P_{V(\text{доп})} = \frac{\gamma \cdot c}{\eta_K} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \quad (6.10)$$

где γ – плотность нагреваемого материала, кг/м³;

c – удельная массовая теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);

η_K – КПД рабочего конденсатора (принимается равным 0,8–0,9);

$\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ – допустимая скорость изменения температуры диэлектрика, °С/с.

Допустимая объемная мощность при ограничении скорости испарения влаги составит:

$$\Delta P_{V(\text{доп})} = \frac{\gamma_{\text{ВЛ}} \cdot a_{\text{П}}}{\eta_K} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau \cdot 100} \quad (6.11)$$

где $\gamma_{\text{ВЛ}}$ – влагосодержание одного кубометра материала, кг/м³;

$a_{\text{П}}$ – удельная теплота испарения влаги (парообразования), кДж/кг;

$\frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau}$ – допустимая скорость изменения относительной влажности диэлектрика, процентов в секунду.

Мощность рабочего конденсатора (максимальная) равна:

$$P_K = \Delta P_V \cdot V \quad (6.12)$$

где V – объем нагреваемого материала, м³.

Колебательная мощность генератора (парообразователя) составит:

$$P_{\Gamma} = \frac{P_K}{\eta_{\text{Э}} \cdot \eta_{\text{Л}}} \quad (6.13)$$

где $\eta_{\text{Э}}$ – электрический КПД колебательного контура (равен 0,65–0,7);

$\eta_{\text{Л}}$ – КПД линии, учитывающий потери в проводниках, соединяющих генератор с колебательным контуром (равен 0,9–0,95).

Мощность, потребляемая генератором из сети, равна:

$$P = \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \frac{P_K}{\eta_{\text{Д.Н}}}, \quad (6.14)$$

$$\text{при этом } \eta_{\text{Д.Н}} = \eta_K \cdot \eta_{\text{Э}} \cdot \eta_{\text{Л}} \cdot \eta_{\Gamma} \quad (6.15)$$

где η_{Γ} – КПД генератора (равен 0,55–0,75);

$\eta_{\text{Д.Н}}$ – общий КПД диэлектрической нагревательной установки.

Выбор частоты диэлектрического нагрева производится для двух режимов: нагрева и сушки сельскохозяйственной продукции.

Максимальное значение частоты по допустимой скорости нагрева устанавливается по формуле (6.16):

$$f = \frac{\gamma \cdot c}{\eta_{\text{к}}} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot K_{\text{п}} \cdot E^2} \quad (6.16)$$

Максимальное значение частоты по допустимой скорости испарения определяется из выражения (6.17):

$$f = \frac{\gamma_{\text{вл}} \cdot a}{\eta_{\text{к}}} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta \tau \cdot 100} \cdot \frac{1}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot K_{\text{п}} \cdot E^2} \quad (6.17)$$

При этом выбирается ближайшая меньшая из разрешенных в технике частот (приложение П).

Расчет размеров камеры нагрева (рабочего конденсатора) включает:

1) объем камеры нагрева принимается на 20 % больше объема нагреваемого материала:

$$V_{\text{к}} = V \cdot 1,2 \quad (6.18)$$

2) расстояние между обкладками конденсатора:

$$l = \frac{V_{\text{к}}}{E} \quad (6.19)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м.

3) площадь обкладок для плоского конденсатора:

$$F = \frac{V_{\text{к}}}{l} \quad (6.20)$$

Размеры сторон обкладок задаются произвольно, в зависимости от требований технологии.

Пример. Порядок расчета сушилки зерна токами высокой частоты:

1. Определяется удельная объемная мощность, необходимая для нагрева одного кубического метра материала:

$$\Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta$$

2. Устанавливается удельный расход электроэнергии для нагрева одного кубического метра материала в течение одного часа:

$$\Delta W_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta$$

3. Производится расчет удельного расхода тепла:

$$q = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{\eta_T}$$

4. Расход тепла для прогрева единицы объема материала равен:

$$q_{\text{прогр}} = \gamma_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$$

Здесь $\gamma_{\text{пр}}$ – плотность продукта кг/м³; $c_{\text{пр}}$ – удельная теплоемкость влажного продукта, кДж/(кг·°С); $t_{\text{н}}$ – начальная температура продукта, °С; $t_{\text{к}}$ – конечная температура продукта, °С.

5. Расход тепла на испарение свободной влаги равен:

$$q_{\text{исп}} = a_{\text{п}} \cdot \gamma_{\text{пр}} \cdot \frac{\varphi_{\text{н}} - \varphi_{\text{к}}}{100 - \omega_{\text{к}}}$$

где $a_{\text{п}}$ – теплота испарения свободной влаги (равна 2 760 кДж/кг); $\varphi_{\text{н}}$ – начальная влажность продукта, %; $\varphi_{\text{к}}$ – конечная влажность продукта, %.

6. С учетом полученных данных, расход электроэнергии на нагрев единицы объема продукта и испарение свободной влаги составит:

$$\Delta W_V = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{3600 \cdot \eta_T}$$

При этом η_T – термический коэффициент полезного действия рабочего конденсата (равен 0,7).

7. Приравняем полученные выражения:

$$5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{3600 \cdot \eta_T}$$

Задача состоит в определении частоты электрического поля и напряженности. Принимается частота в средневолновом диапазоне с длиной волны, составляющей 300 м. При $f = 1$ МГц определяется нужная напряженность поля.

8. Из выражения расхода электроэнергии на единицу массы продукта расход электроэнергии на обработку одного килограмма составит:

$$\Delta W'_V = \frac{\Delta W_V}{\gamma_{\text{пр}}}$$

9. Расход электроэнергии равен:

$$\Delta W''_V = \frac{\Delta W'_V}{\varphi_{\text{н}} - \varphi_{\text{к}}}$$

10. Пусть производительность сушилки (m'), тогда потребная мощность на сушку составит:

$$P_{\text{потр}} = \frac{\Delta W_V \cdot m'}{\gamma_{\text{пр}}}$$

11. Таким образом, мощность, потребляемая из сети, равна:

$$P = \frac{P_{\text{потр}}}{\eta_{\text{общ}}}$$

При этом $\eta_{\text{общ}}$ – общий коэффициент полезного действия высокочастотной установки, равный 0,5. Он учитывает КПД лампового генератора, а также КПД колебательного контура.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите величину заряда диэлектрической частицы (влаги), имеющей диаметр $d = 10$ мкм и находящейся в поле коронного разряда с напряженностью E , если давление воздуха равно нормальному атмосферному; влажность $\varphi = 65$ %; коэффициент кратности тока короны $K = 16$. Определите ток коронного разряда и силу, действующую на частицу, если расстояние между электродами равно $l = 0,5$ м. Диаметр коронирующего электрода $d_0 = 1$ мм.

Отношение действительной напряженности к критическому значению составляет $E/E_0 = 1,8$.

2. Рассчитайте установку ВЧ диэлектрического нагрева для сушки зерна мощностью $P_k = 50$ кВт (полезная мощность рабочего конденсатора). Начальная влажность зерна $\varphi_n = 20$ %. Конечную влажность сухого зерна принять равной $\varphi_k = 12$ %. Допустимая напряженность электрического поля составляет $E_{дон} = 800$ В/см. Допустимая температура нагрева $t_{дон} = 48$ °С. Электрическая проницаемость зерна $\varepsilon = 7,9$. Тангенс угла диэлектрических потерь зерна принять равным $tg\delta = 0,033$. Объемный вес пшеницы $\gamma_z = 850$ кг/м³. Начальная температура зерна $t_{нач} = 20$ °С. Напряжение на конденсаторе $U_k = 50$ кВ. Определите производительность установки.

3. Рассчитайте установку диэлектрической сушки зерна с производительностью $m' = 100$ кг/ч при начальной влажности $\varphi_n = 20$ %. В начале происходит нагрев зерна от начальной температуры $t_{нач}$ до температуры $t = 50$ °С. Конечную влажность принять равной $\varphi_k = 14$ %. Параметры зерна: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 12$; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0,012$; удельная массовая теплоемкость $c = 1,7$ кДж/(кг·°С). Допустимая напряженность электрического поля составляет $E_{дон} = 1$ кВ/см; скорость нагрева $\Delta t/\Delta \tau = 50$ °С/мин; скорость испарения $\Delta \varphi/\Delta \tau = 0,05$ % за одну секунду; насыпная плотность зерна $\gamma_z = 1\ 070$ кг/м³. Напряжение на обкладках конденсатора составляет $U_k = 10$ кВ.

4. Рассчитайте установку диэлектрического нагрева для размораживания пищевых продуктов массой $m = 1$ кг, влажностью $\varphi = 70$ %. Начальная температура продукта $t_1 =$ минус 10 °С; конечная температура $t_2 = 10$ °С. Удельная теплоемкость продукта составляет $c = 2,8$ кДж/(кг·°С); удельная теплота плавленной льда $a_{пл} = 334$ кДж/кг; время размораживания $\tau = 5$ мин.; допустимая напряженность электрического поля $E_{дон} = 5$ кВ/см; КПД $\eta = 0,5$.

5. Известны размеры камеры нагрева: $d = 0,05$ м; $b = 0,2$ м; $h = 0,05$ м, в которой осуществляется пастеризация молока с нагревом его от температуры $t_1 = 10$ °С до $t_2 = 75$ °С. Требуемая производительность установки составляет $m' = 120$ кг/ч. Определите мощность и частоту генератора ВЧ, если известны допустимая напряженность электрического поля $E_{дон} = 1,2$ кВ/см; плотность молока $\gamma = 985$ кг/м³; его удельная теплоемкость $c = 4$ кДж/(кг·°С); диэлектрическая проницаемость (относительная) $\varepsilon = 75$; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0,023$.

6. Установка диэлектрического нагрева имеет следующие параметры: напряженность электрического поля $E = 0,5$ кВ/см; частота тока $f = 10$ МГц. В камере нагрева стерилизуются фрукты в стеклянных банках объемом 0,5; 0,6 и 1 л, имеющих размеры: $d_{0,5} = 0,085$ м и $h_{0,5} = 0,115$ м; $d_{0,6} = 0,085$ м и $h_{0,6} = 0,14$ м; $d_1 = 0,1$ м и $h_1 = 0,16$ м. Обкладки конденсатора соответствуют размерам банки. Время стерилизации $\tau = 30$ с.

7. Определите мощность, выделяемую в рабочем конденсаторе при нагреве деревянного блока площадью $F = 2$ м² и толщиной $\delta = 0,05$ м. Относительная проницаемость дерева составляет $\varepsilon = 6$; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0,25$; частота $f = 300$ МГц; напряженность поля $E = 20$ кВ/м.

Контрольные вопросы

1. В каких технологических процессах сельского хозяйства целесообразно применение диэлектрического нагрева?

2. Объясните механизм процесса высокочастотной сушки полупроводниковых материалов и перечислите преимущества этого метода.

3. Объясните физическую сущность нагрева полупроводников и диэлектриков в электрическом поле высокой частоты.

4. Дайте понятие идеального и реального диэлектрика.

5. В чем различие режимов нагрева диэлектриков токами высокой частоты при наличии или отсутствии воздушного зазора в рабочем конденсаторе?
6. Каким образом и за счет чего может быть осуществлен селективный нагрев неоднородного диэлектрика в электрическом поле высокой частоты?
7. В чем заключаются условия правильного выбора частоты электрического поля при диэлектрическом нагреве?
8. От каких параметров и каким образом зависит удельная объемная мощность при диэлектрическом нагреве?
9. По какому признаку осуществляется классификация установок диэлектрического нагрева?
10. Как проявляется поверхностный эффект в установках диэлектрического нагрева?
11. Как выбирается частота тока в установках диэлектрического нагрева?
12. В каких установках камерой нагрева является объемный резонатор?
13. На какие группы делятся диэлектрики по величине относительной диэлектрической проницаемости?

7 УСТАНОВКИ ИНФРАКРАСНОГО НАГРЕВА

Инфракрасный нагрев является особым видом нагрева излучением. **Инфракрасные лучи** представляют собой электромагнитные колебания с длиной волны от 0,76 до 420 мкм. Они обладают значительным тепловым воздействием, особенно в области длин волн около 0,8 мкм.

Инфракрасное излучение не поглощается воздухом и на 70 % поглощается водой. В приемнике оно преобразуется в тепло, повышая температуру облучаемых тел. Инфракрасное излучение обладает проникающими свойствами, вызывая положительные биологические реакции глубоких подкожных слоев.

Области использования инфракрасного излучения:

- 1) для обогрева молодняка животных и птицы;
- 2) сушка овощей и фруктов;
- 3) предпосевная обработка семенного материала;
- 4) дезинфекция.

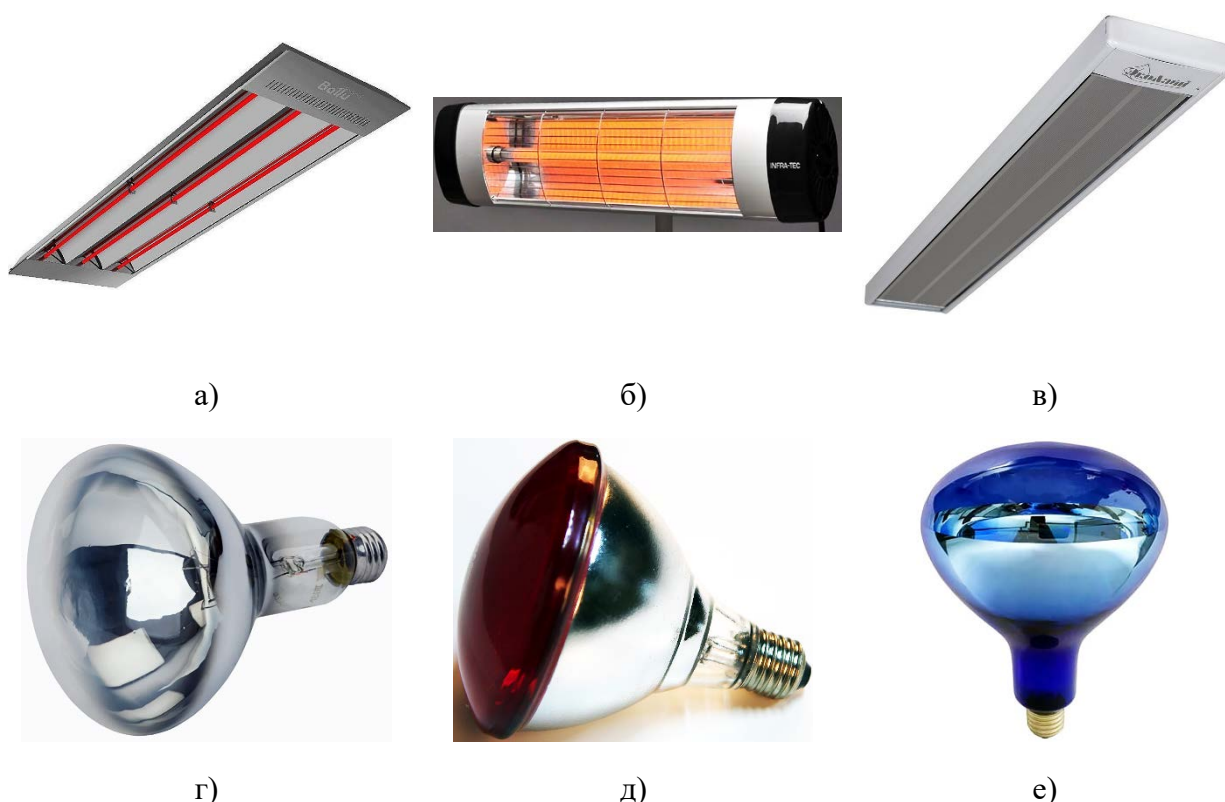
Биологические виды действия инфракрасного излучения:

- 1) тепловой эффект (через 1–2 минуты количество крови в облучаемом участке увеличивается в 10–15 раз);
- 2) улучшение функций желез, кроветворных органов и кровоснабжения тканей тела;
- 3) закаливание организма, чередование воздействия низких и высоких температур;
- 4) повышает тонус, улучшает прирост, развитие, сохранность;
- 5) отрицательное действие оказывается при длительном непрерывном воздействии инфракрасного излучения.

Использование инфракрасного излучения в технических процессах сельскохозяйственного производства. *Обработка посевного материала:* за

10–30 с температура повышается до 25–45 °С, что приводит к увеличению урожая, улучшению качества зерна. С этой целью широко применяется установка ЭМПОС-2, которая совмещает в себе источники инфракрасного и видимого излучения (при использовании лампы накаливания в течение 40–60 с температура повышается до 48–55 °С). Одновременно идет сушка, дезинсекция материала, повышение качества зерна. Установленная мощность равна 16 кВт, производительность достигает 500 кг/ч.

Источники инфракрасного излучения представлены на рисунке 7.1.



а) обогреватель инфракрасный потолочный с открытыми ТЭН – БАЛЛУ ВИНТ-4,5; б) инфракрасный обогреватель Infra-Тес IF-3000; в) потолочный инфракрасный обогреватель ЭкоЛайн ЭЛК 06R; г) ИКЗ 250 Вт для животных; д) лампа инфракрасная энергосберегающая Eider 100 Вт; е) лампа инфракрасная с синей колбой

Рисунок 7.1 – Источники инфракрасного излучения

Для дезинсекции мешкотары используется передвижной дезинсектор, представляющий собой два плоских вертикальных инфракрасных источника, между которыми передвигаются мешки. Время обработки – 70 с; нагрев идет

до температуры 100 °С. При этой температуре насекомые гибнут. Мощность установки составляет 12,6 кВт.

Пастеризация молока. За время обработки 3–4 с гибнут 1 005 микробов. Обработка позволяет осуществить хранение молока в течение 8–10 суток при температуре 5 °С. В этом процессе используется кварцевая галогенная лампа типа КГ-220-1000-1 мощностью 1 000 Вт.

Сушка лакокрасочных покрытий. При этом источники инфракрасного излучения располагают на высоте 0,2–0,5 м над обрабатываемой поверхностью.

7.1 Расчет установок

Расчет установок местного обогрева с ИК-лампами. Инфракрасные излучатели можно использовать индивидуально или комплектовать в групповые светильники с двумя, тремя или четырьмя лампами, монтируемыми на специальном подвесном устройстве, которое крепится к потолку и позволяет регулировать высоту подвеса облучателей от 0,4 до 1,2 метра, а расстояние между их осями – от 0,3 до 0,8 метра в зависимости от вида животных и их возраста. Температура на уровне пола при этом изменяется от 25 до 45 °С. Молодняк сельскохозяйственных животных в первые два месяца жизни облучается круглосуточно, взрослое поголовье – 4–6 часов в сутки.

В качестве источников инфракрасного облучения молодняка животных и птицы можно использовать как темные, так и светлые технические излучатели. Темные излучатели имеют сравнительно низкую температуру (до 500 °С) и испускают лучи от 3 мкм и выше. К светлым излучателям относятся лампы ИКЗ, ЗС мощностью от 250 до 500 Вт на напряжение 127 и 220 В. Срок службы составляет 2 000 ч.

Определение потребной мощности нагрева для этих установок ведется на одну обогреваемую площадку. Так, теоретически необходимая мощность обогрева на одну площадку рассчитывается по формуле (7.1):

$$P_{1\text{тн}} = P_{\text{уд}} \cdot N \cdot f \quad (7.1)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельная поверхностная мощность нагрева пола, Вт/м²;

N – число животных на одной площадке, гол.;

f – удельная площадь обогрева на одно животное, м²/гол.

По теоретически необходимой мощности определяется требуемая мощность обогрева одной площадки:

$$P_{1\text{тр}} = \frac{P_{1\text{тн}}}{\eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{и}}} \cdot K_{\text{з}} \quad (7.2)$$

где $\eta_{\text{э}}$ – энергетический КПД инфракрасных ламп (равен 0,7–0,8);

$\eta_{\text{и}}$ – коэффициент использования инфракрасного излучения (составляет от 0,7 до 0,85);

$K_{\text{з}}$ – коэффициент запаса (равен 1,1–1,3).

Далее производится выбор ИК-излучателей и облучательных установок. Необходимое число ламп или облучающих установок на одну площадку определяют по формуле (7.3):

$$n_1 = \frac{P_{1\text{тр}}}{P_{\text{л}}} \quad (7.3)$$

где $P_{\text{л}}$ – номинальная мощность выбранной ИК-лампы, кВт.

Выбирается ближайшее большее число ламп. Размещение ламп на площадке выполняется в соответствии с рекомендациями. Общее число ламп или облучателей можно определить по формуле (7.4):

$$n = n_1 \cdot z \quad (7.4)$$

где z – число обогреваемых площадок.

Общая мощность инфракрасного местного обогрева составит:

$$P_{\text{ИК}} = P_{\text{л}} \cdot n \quad (7.5)$$

Рекомендации по размещению облучателей были приведены выше.

Расчет устройств ИК местного обогрева с ТЭН (темные излучатели) ведется по той же методике, что и для инфракрасных ламп. При этом величина коэффициента использования инфракрасного излучения ($\eta_{и}$) принимается в пределах 0,5–0,6.

Инфракрасная термообработка жидких сред. Электропастеризационные установки, использующие ИК-излучение, сокращают продолжительность термической обработки жидких кормов и продуктов. Инфракрасные аппараты используются для нагрева воды, фруктовых, ягодных и овощных соков, молока и других сред с целью пастеризации.

Наиболее перспективны установки, в которых обрабатываемый материал тонким слоем протекает по поверхности твердого тела.

Параметры ИК-излучателя для термообработки жидких сред рассчитывают в следующей последовательности.

Определяется температура источника инфракрасных лучей. В практике расчетов принимают температуру в пределах 700–800 °С.

Толщина слоя жидкости выбирается с учетом проникающей способности ИК-лучей. Для пастеризационных установок она составляет $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Скорость движения жидкости по внутренней поверхности рассчитывается по формуле (7.6):

$$v = 9 \cdot 10^3 \cdot \frac{\nu}{\delta} \quad (7.6)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Длина рабочей части цилиндра составит:

$$l = v \cdot \tau \quad (7.7)$$

где τ – заданная продолжительность обработки материала, с.

Мощность источника инфракрасных лучей определяют по формуле (7.8):

$$P = \frac{m' \cdot c \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})}{3600 \cdot \eta} \quad (7.8)$$

где m' – массовый расход материала, кг/ч;

c – удельная массовая теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);

η – коэффициент полезного действия установки (равен 0,95).

Площадь поверхности источника ИК-лучей составит:

$$F_{\text{и}} = \frac{P}{\varepsilon_{\text{и}} \cdot \sigma \cdot t_{\text{и}}^4} \quad (7.9)$$

где $\varepsilon_{\text{и}}$ – интегральный коэффициент излучения источника (равен 0,9);

σ – постоянная (равна $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)).

Диаметр излучателя находится по формуле (7.10):

$$d_{\text{и}} = \frac{F_{\text{и}}}{\pi \cdot l_{\text{и}}} \quad (7.10)$$

где $l_{\text{и}}$ – длина излучателя, м (принимается, что $l_{\text{и}} = l$).

Далее производится подбор типа источника излучения по мощности, температуре и размерам. В качестве источника могут быть приняты лампы накаливания с галогенным циклом, ТЭН, а также керамические трубки с нихромовым нагревательным элементом.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите число ИК-ламп и их мощность, предназначенных для обогрева молодняка животных на площадке $F = 10$ м², если известна необходимая энергетическая облученность, составляющая $E = 300$ Вт/м². Площадка квадратная. Приведите чертеж установки ламп и схему включения.

2. Определите мощность и выберите лампу накаливания; определите высоту подвеса облучателя ССП05-250 с этой лампой для обогрева теленка до двухнедельного возраста при одиночном содержании в клетке. Температура воздуха в помещении составляет $t_{\text{в}} = 12$ °С.

3. Определите параметры инфракрасной облучательной установки для обогрева группы телят в возрасте 20 дней при температуре воздуха в помещении, составляющей $t_e = 10$ °С.

4. Поросята месячного возраста содержатся в помещении при температуре $t_e = 13$ °С и $t_p = 10$ °С. Определите параметры инфракрасной установки с лампами ИКЗК для обогрева поросят на площадке площадью $1,5$ м².

5. Рассчитайте установку на инфракрасных лампах для обогрева цыплят, содержащихся на полу на площадке 4 м², если в помещении температура составляет $t_e = 22$ °С и $t_p = 18$ °С.

Контрольные вопросы

1. Каков диапазон инфракрасного излучения в спектре электромагнитных колебаний?

2. В чем заключается основное отличие темных и светлых инфракрасных излучателей?

3. В чем состоит избирательность действия инфракрасного излучения?

4. В чем преимущества инфракрасного нагрева перед другими видами?

5. В каких технологических процессах целесообразно применение установок инфракрасного нагрева?

6. По какому параметру производится расчет установок инфракрасного обогрева сельскохозяйственных животных?

7. Каким путем можно регулировать энергетическую облученность обогреваемой поверхности?

8. Приведите примеры темных и светлых источников инфракрасного излучения.

9. С какой целью осуществляется обработка посевного материала инфракрасным излучением?

10. Что является основными параметрами установки инфракрасной пастеризации молока?

8 УСТАНОВКИ СООРУЖЕНИЙ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

В сооружениях защищенного грунта для обогрева используют электро-термические устройства. Причем для обогрева воздуха применяют только косвенный нагрев методом сопротивления, а для обогрева почвы – прямой и косвенный нагрев методом сопротивления, а также косвенный индукционный.

В парниках и теплицах распространены элементный и электрокалориферный способы нагрева. Для этих целей в качестве нагревательных элементов используют стальную неизолированную оцинкованную проволоку диаметром от 2 до 6 мм; нагревательные провода ПОСП, ПОСХВ, ПОСХВТ, ПНВСВ и кабели.

Обогрев с помощью нагревателей из стальной неизолированной проволоки. Нагреватели размещают в асбоцементных или гончарных трубах диаметром от 100 до 150 мм, которые укладывают в песке над слоем почвы. Нагреватели надежно защищены от механических повреждений трубами, чем обеспечивается безопасность их обслуживания при питании сетевым напряжением. Трубы способствуют также более равномерному нагреву почвы. Однако широкое применение трубчатых нагревательных элементов ограничено малым сроком их службы (2–3 сезона) и дефицитом асбоцементных труб.

Нагревательные элементы из стальной проволоки могут быть выполнены и без труб. В этом случае для обогрева почвы проволоку диаметром, составляющим 4–7 мм, укладывают параллельными нитями вдоль парника или теплицы в слое песка толщиной 100–150 мм, находящегося под почвой.

Песок, обладающий хорошими теплопроводящими свойствами, улучшает теплоотдачу проволоки и способствует выравниванию температуры в почве. Удельная мощность нагревательных элементов составляет 15–25 Вт/м, напряжение питания – 12–60 В.

Этот способ обогрева характеризуется простотой конструкции нагревательных элементов, их высокой эксплуатационной надежностью и долговечностью, равномерным распределением температуры в почве. Однако он связан с необходимостью применения понижающих трансформаторов.

При использовании нагревательных проводов и кабелей их укладывают также, как и нагревательные элементы из стальной неизолированной проволоки. Расстояние между проводами выбирают таким образом, чтобы неравномерность температуры на поверхности почвы не превышала 3–5 °С.

Для защиты нагревательного провода от механических повреждений его заливают цементно-песочной смесью (1:10), образующей прочный слой толщиной 4–5 см, или в песок под проволоку на расстоянии 50 мм укладывают металлическую сетку с ячейками 50×50 мм. Сетку присоединяют к нулевому проводу сети. Для питания нагревательных элементов применяют напряжение 380/220 В.

В сооружениях защищенного грунта обогрев нагревательным проводом (рис. 8.1) выступает одним из наиболее распространенных способов. Его достоинства заключаются в равномерности обогрева почвы, отсутствии понижающих трансформаторов, повышении срока службы.

Также для обогрева можно использовать асфальтобетонные блоки, асфальтобетонные нагревательные устройства.

8.1 Расчет установок

Мощность установок электрообогрева сооружений защищенного грунта должна быть достаточной для компенсации максимальных тепловых потерь в окружающую среду в ночное время, когда отсутствует солнечная радиация, а значение наружной температуры минимальное.

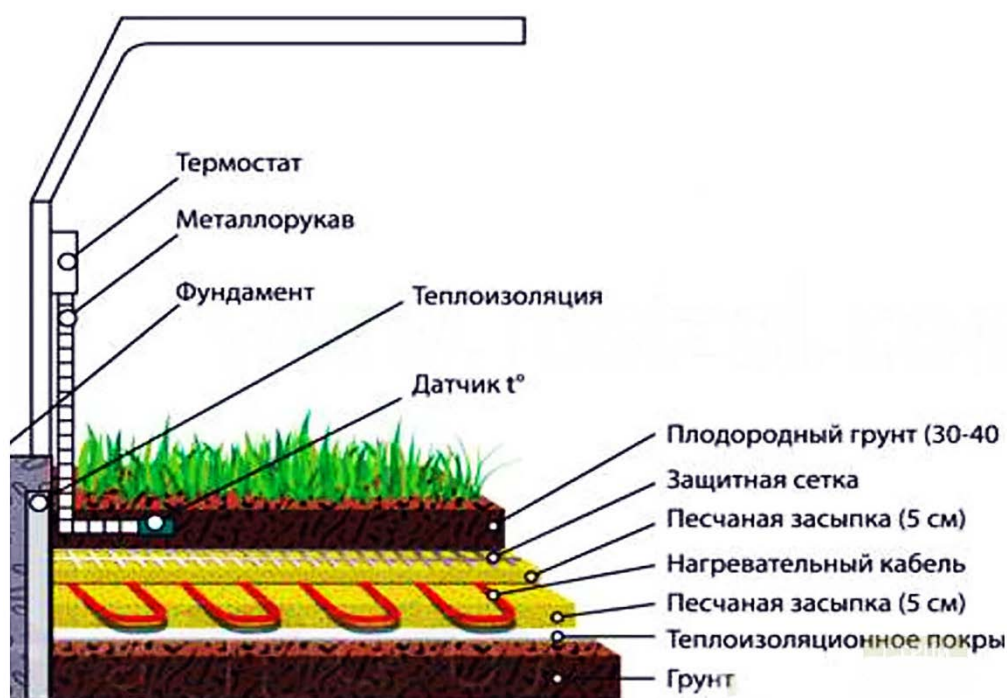


Рисунок 8.1 – Устройство обогрева почвы в теплице

Уравнение теплового баланса помещения закрытого грунта имеет вид:

$$Q_{об} = Q_{огр} + Q_{инф} + Q_{гр} \quad (8.1)$$

где $Q_{об}$ – тепловая мощность электрообогревательной установки, Вт;

$Q_{огр}$ – тепловой поток, теряемый через отдельные элементы ограждения сооружения, Вт;

$Q_{инф}$ – тепловой поток, теряемый в связи с инфильтрацией воздуха через неплотности ограждений, Вт;

$Q_{гр}$ – тепловой поток потерь в грунт, Вт.

Мощность нагревательных элементов находится по формуле (8.2):

$$P = \frac{Q_{об}}{\eta} \quad (8.2)$$

где η – КПД электрообогревательного устройства.

Если установка электрообогрева находится непосредственно в культивационном помещении, то КПД электрообогревательного прибора равен единице.

Потери теплоты ($Q_{огр}$) легко определяют по формуле потерь через плоскую стенку. Точно рассчитать потери $Q_{инф}$ и $Q_{гр}$ сложно, поскольку потери на

инфильтрацию зависят от конструкции и состояния строительной части сооружения, а расчет потерь в грунт сопряжен с математическими трудностями из-за сложности картины теплового поля растекания. Поэтому мощность, требуемую для электрообогрева парника или теплицы, можно вычислить лишь приближенно. Стремиться к большой точности расчета нет необходимости, так как он проводится для каких-то средних многолетних климатических условий, и, следовательно, задача в значительной степени усредняется.

Основная доля потерь (примерно 70 %) приходится на светопрозрачные ограждения (стекло или пленку).

С учетом сказанного в практических расчетах мощность установок для электрообогрева парников и теплиц определяют по приближенной формуле (8.3):

$$P = \alpha \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \cdot F_{\text{огр}} \quad (8.3)$$

где α – коэффициент теплопередачи, приведенный к площади светопрозрачного ограждения, Вт/(м²·°С) (зависит от скорости воздуха и определяется по данным рисунка 8.2);

$t_{\text{вн}}$ – температура внутри парника или теплицы, °С;

$t_{\text{нар}}$ – расчетная наружная температура, °С (в соответствии с установленными требованиями для зимних теплиц необходимо брать среднюю температуру наиболее холодных суток с обеспеченностью 0,92, а для весенних теплиц – среднюю температуру наиболее холодного месяца за период эксплуатации, сниженную наполовину от максимальной суточной амплитуды температуры воздуха);

$F_{\text{огр}}$ – площадь светопрозрачного ограждения, м².

При комбинированном (почвенно-воздушном) обогреве расчетную мощность делят между нагревателями почвы ($P_{\text{п}}$) и воздуха ($P_{\text{в}}$) в следующем соотношении ($P_{\text{п}}/P_{\text{в}}$): для теплиц – 1:1 или 1:2; для парников – 1:1 или 2:1.

Для расчета нагревательных элементов парников и теплиц используют экспериментальные графики зависимости температуры нагревателя от диаметра проволоки, силы тока, мощности и напряжения провода длиной, составляющей один метр.

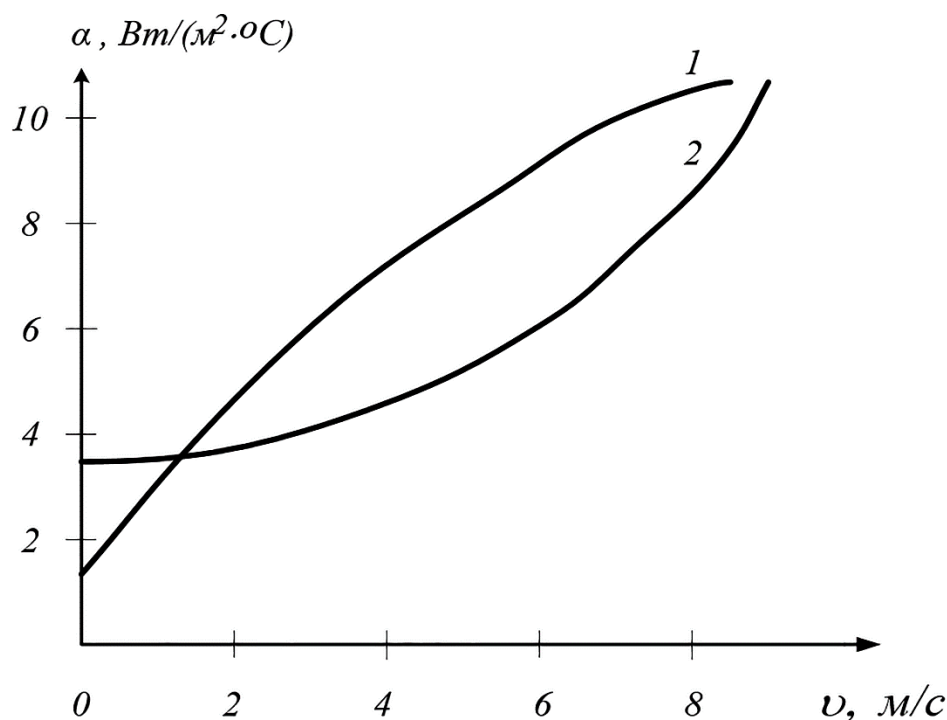


Рисунок 8.2 – Значение коэффициента теплоотдачи через остекление теплиц (1) и парников (2) при разной скорости ветра

Особенность расчета заключается в том, что длину нагревательного элемента принимают в начале расчета в зависимости от геометрических размеров культивационного помещения и схемы соединения нагревателей, а диаметр проволоки нагревателя рассчитывают. Например, если вдоль парника проложено два нагревателя, то при последовательном соединении нагревателей четырех парников общая длина проволоки составит: $21,5 \cdot 2 \cdot 4 = 172$ м.

Нагревательные элементы из стальной проволоки в асбоцементных или гончарных трубах рассчитывают путем совместного графического решения уравнений: $t_{н.э} = f(d)$, где $t_{н.э}$ – температура нагревательного элемента.

Данное уравнение отражает условия теплообмена нагревателя и записывается на основе законов теплопередачи:

$$t_{н.э} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + t_{в} \quad (8.4)$$

где Δt_1 – температурный перепад между нагревателем и внутренней поверхностью трубы, °С;

Δt_2 – перепад температуры в трубе, °С;

Δt_3 – перепад температуры между наружной поверхностью трубы и воздухом в парнике, °С;

t_B – температура воздуха в парнике, °С.

Величины Δt_1 и Δt_3 как функции линейной мощности P_1 и диаметров проволоки d и трубы D определяют по кривым рисунка 8.3.

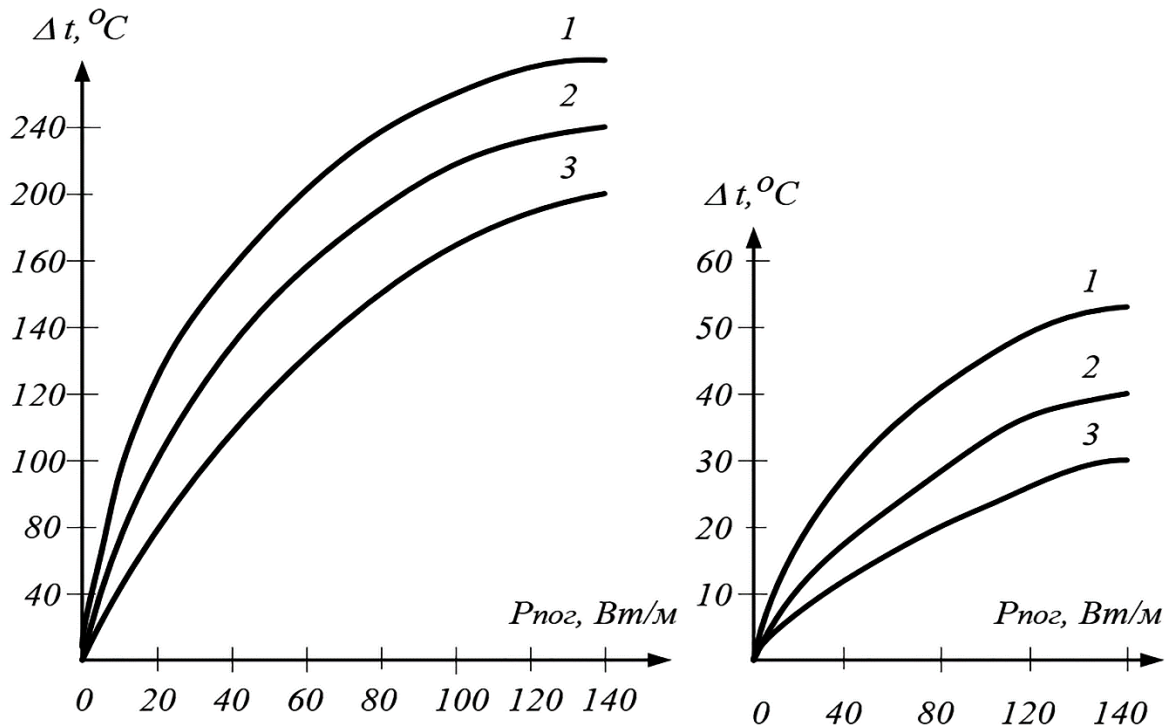


Рисунок 8.3 – Зависимость перепада температуры между нагревательной проволокой и внутренней поверхностью асбоцементной трубы от погонной мощности

Перепад температуры в трубе определяют по формуле (8.5):

$$\Delta t_2 = \frac{P_1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D_H}{D_B} \quad (8.5)$$

где λ – теплопроводность материала трубы, Вт/(м·°С);

D_H и D_B – соответственно наружный и внутренний диаметры трубы, м.

Для асбоцементных труб диаметром 0,05–0,1 м с учетом значений перечисленных параметров формулы (8.5) можно принять $\Delta t_2 = 0,06 \cdot P_1$.

Для нагревателя почвы температура нагревательных элементов составит:

$$t_{н.э.поч} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_{пес} + \Delta t_{поч} + t_{поч} \quad (8.6)$$

где Δt_1 и Δt_2 – температурный перепад между нагревателем и внутренней поверхностью трубы и перепад температуры в трубе соответственно, °С;

$\Delta t_{\text{пес}}$ – температурный перепад в слое песка, °С;

$\Delta t_{\text{поч}}$ – температурный перепад в слое почвы, °С;

$t_{\text{поч}}$ – температура поверхности почвы, °С.

Перепад температур в слое песка и температурный перепад в слое почвы рассчитывают соответственно по формулам (8.7) и (8.8):

$$\Delta t_{\text{пес}} = 0,3 \cdot P_1 \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot \delta_1}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \delta_1}{D} \right)^2 - 1} \right], \quad (8.7)$$

$$\Delta t_{\text{поч}} \approx 1,1 \cdot \delta_2 \cdot P_1 \quad (8.8)$$

где δ_1 и δ_2 – толщина слоя соответственно песка и почвы, м.

Уравнение $t_{\text{н.э}} = f(d)$, получаемое из выражения для электрического сопротивления стальной проволоки длиной 1 м и диаметром d при рабочей температуре $t_{\text{н.э}}$, характеризует зависимость температуры проволоки от диаметра, мощности и напряжения.

При удельном сопротивлении проволоки $\rho_{20} = 0,13 \cdot 10^{-6}$ Ом·м температурный коэффициент $\alpha_t = 0,0045$ °С⁻¹ и коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,93$. В данном случае имеем выражение (8.9):

$$t_{\text{н.э}} = 222 \cdot \left[\frac{5,4 \cdot 10^6 \cdot U_{\text{пог}}^2 \cdot d^2}{K_{\text{п}} \cdot P_1} - 1 \right] + 20, \quad (8.9)$$

$$\text{где } U_{\text{пог}} = \frac{U}{l_{\text{н.э}}}, \quad (8.10)$$

$$\text{где } K_{\text{п}} = 1 + 0,0176 \cdot d^{2,2} \quad (8.11)$$

где $U_{\text{пог}}$ – напряжение проволоки длиной один метр, В/м;

U – напряжение, подводимое к нагревательному элементу, В;

$l_{\text{н.э}}$ – длина проволоки одного нагревательного элемента, м;

d – диаметр проволоки, м;

$K_{\text{п}}$ – отношение сопротивления стальной проволоки переменному току к сопротивлению стальной проволоки постоянному току при той же температуре (коэффициент поверхностного эффекта).

Мощность проволоки длиной один метр (погонная мощность) составит:

$$P_{\text{пог}} = \frac{P_{\text{н.э}}}{l_{\text{н.э}}} \quad (8.12)$$

где $P_{\text{н.э}}$ – мощность нагревательного элемента, Вт.

Путем совместного графического решения уравнений определяют диаметр и температуру стальной проволоки, которая не должна превышать 300 °С.

Схема управления почвенным обогревом. Для обогрева почвы нагреватели из нагревательного провода размещают в асбоцементных или гончарных трубах диаметром 100–150 мм, которые укладывают в песке под слоем почвы и подключают к питающей сети напряжением 380/220 В.

Автоматическое управление мощностью нагревательных элементов позволяет создать оптимальный температурный режим почвы и воздуха, снизить потребление электроэнергии.

В предложенной принципиальной электрической схеме управления почвенными нагревательными элементами $EK1 \dots EK3$ (рис. 8.4) мощностью элементов управляют тиристоры $VS1 \dots VS6$, включенные попарно встречно-параллельно. Открываются и закрываются они контактами реле $KV1$ при замыкании и размыкании цепей.

Реле $KV1$ включается контактами $UK1$ двухпозиционного регулятора температуры. Реле времени $KT1$ в зависимости от положения переключателя $SA4$, изменяя соотношение времени включенного и отключенного состояния, выполняет две программы работы, обеспечивающие 50 и 25 % мощности нагревательных элементов. Кроме того, благодаря реле $KT1$ система обогрева работает по заданной программе, исходя из графика загрузки энергосистемы.

Защитное отключение системы обогрева при токах утечки более 100 мА выполняет устройство AF , при срабатывании которого получает питание катушка независимого расцепителя автоматического выключателя $QF1$. Контакты выключателя SQ блокируют работу системы обогрева при открывании двери на входе в культивационное помещение. Блок световой сигнализации индуцирует наличие питающего напряжения на нагревательных элементах.

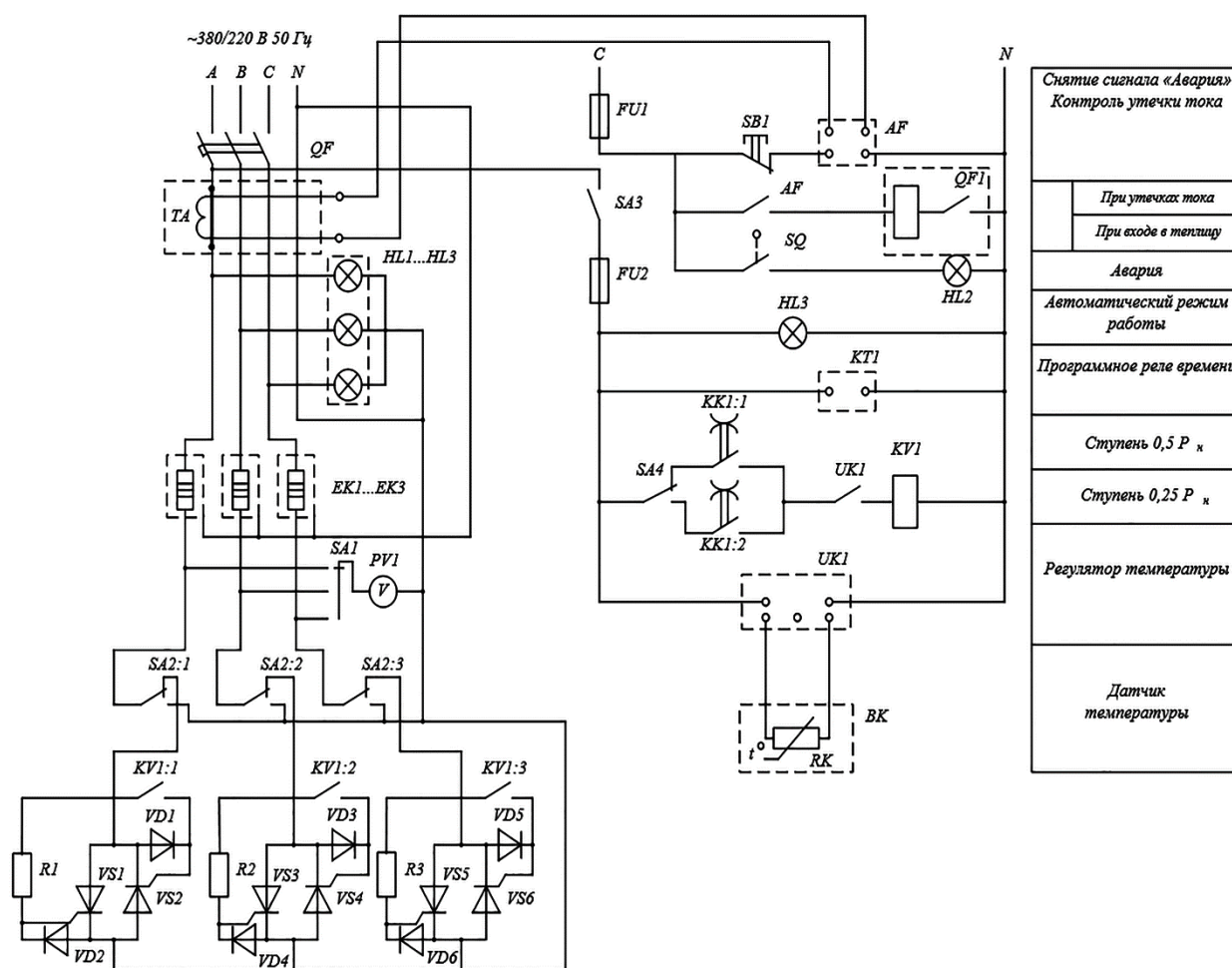


Рисунок 8.4 – Схема электрическая принципиальная управления почвенным обогревом в теплице

При помощи переключателя *SA1* и вольтметра *PV* контролируют целостность нагревателя при закрытых тиристорах *VS1...VS6*. Переключателями *SA2* и *SA3* устанавливают ручной или автоматический режим работы нагревателей.

Пример. Определите диаметр стальной оцинкованной проволоки и мощность, необходимую для обогрева квартала из 12 20-рамных парников. Стальная проволока для обогрева почвы и воздуха расположена в асбоцементных трубах диаметром 0,1 м. Напряжение сети составляет 380/220 В. Температура воздуха в парнике 18 °С, расчетная температура наружного воздуха 7,3 °С, скорость ветра 5 м/с.

Решение: При скорости ветра 5 м/с коэффициент теплопередачи через остекление по графику рисунка 8.2 составляет 6,3 Вт/(м²·°С).

Площадь остекления 20-рамного парника (рамы размером $1,06 \times 1,6$ м, коэффициент остекленности 0,95) равна: $20 \times 1,06 \times 1,6 \times 0,95 = 32 \text{ м}^2$.

Мощность, необходимая для обогрева одного парника, составит:

$$P_1 = 6,3 \cdot [18 - (-7,3)] \cdot 32 \cdot 10^{-3} = 5,1 \text{ кВт}$$

Для ранних парников соотношение мощностей почвенного и воздушного обогрева ($P_{\text{п}}/P_{\text{в}}$) принимается равным 1:1. Тогда:

$$P_{\text{п1}} = P_{\text{в1}} = \frac{P_1}{2} = \frac{5,1}{2} = 2,55 \text{ кВт}$$

При длине нагревательного элемента почвы и воздуха в одном парнике 43 м погонная мощность провода составит:

$$P_{\text{пог.п}} = P_{\text{пог.в}} = \frac{P_{\text{п1}}}{l_{\text{н.э}}} = \frac{P_{\text{в1}}}{l_{\text{н.э}}} = \frac{2550}{43} = 59,3 \text{ Вт/м}$$

Напряжение нагревательного элемента длиной один метр при последовательном соединении четырех парников равно:

$$U_1 = \frac{380}{4 \cdot 43} = 2,2 \text{ В/м}$$

Для построения кривых $t_{\text{н.э.в}} = f_1(d)$ и $t_{\text{н.э.поч}} = f_2(d)$ находятся значения Δt_1 и Δt_3 по кривым рисунка 8.3 для $P_{\text{пог}} = 59,3 \text{ Вт/м}$, трех значений диаметров проволоки (2; 2,5 и 3 мм) и диаметра трубы 100 мм.

Затем определяют следующие параметры ($^{\circ}\text{C}$):

$$\Delta t_2 = 0,06 \cdot 59,3 = 3,5$$

$$\Delta t_{\text{пес}} = 0,3 \cdot 59,3 \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot 0,125}{0,1} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 0,125}{0,1} \right)^2 - 1} \right] = 28$$

$$\Delta t_{\text{пес}} = 1,1 \cdot \delta_2 \cdot P_1 = 1,1 \cdot 0,2 \cdot 59,3 = 13$$

Результаты расчета сводят в таблицу 8.1.

Значения коэффициента $K_{\text{п}}$ для тех же значений диаметров проволоки:

1) при $d = 2$ мм: $K_{\text{п}} = 1 + 0,0176 \cdot 2^{2,2} = 1,08$;

2) при $d = 2,5$ мм: $K_{\text{п}} = 1 + 0,0176 \cdot 2,5^{2,2} = 1,14$;

3) при $d = 3$ мм: $K_{\Pi} = 1 + 0,0176 \cdot 3^{2,2} = 1,2$.

Таблица 8.1 – К расчету электрообогрева парников

d , мм	Δt_1 , °C	Δt_2 , °C	Δt_3 , °C	$\Delta t_{\text{пес}}$, °C	$\Delta t_{\text{поч}}$, °C	$t_{\text{в}}$, °C	$t_{\text{н.э в}}$, °C	$t_{\text{поч}}$, °C	$t_{\text{н.э поч}}$, °C
2	210	3,5	17	28	13	18	248,5	18	272,5
2,5	193	3,5	17	28	13	18	231,5	18	255,5
3	176	3,5	17	28	13	18	214,5	18	238,5

Для построения кривой $t_{\text{н.э}} = f(d)$ вычисляем по формуле значения $t_{\text{н.э}}$ для диаметров проволоки 2; 2,5 и 3 мм (°C):

$$t_{\text{н.э}} = 222 \cdot \left[\frac{5,4 \cdot 10^6 \cdot 2,2^2 \cdot 0,002^2}{1,08 \cdot 59,3} - 1 \right] + 20 = 162;$$

$$t_{\text{н.э}} = 222 \cdot \left[\frac{5,4 \cdot 10^6 \cdot 2,2^2 \cdot 0,0025^2}{1,14 \cdot 59,3} - 1 \right] + 20 = 334;$$

$$t_{\text{н.э}} = 222 \cdot \left[\frac{5,4 \cdot 10^6 \cdot 2,2^2 \cdot 0,003^2}{1,2 \cdot 59,3} - 1 \right] + 20 = 532$$

Пересечение кривых $t_{\text{н.э в}} = f_1(d)$, $t_{\text{н.э поч}} = f_2(d)$ и $t_{\text{н.э}} = f(d)$ дает значения диаметра проволоки нагревателя воздуха – 2,25 мм и почвы – 2,3 мм, а также значения температуры соответственно 240 и 260 °C.

Установленная мощность квартала парников составит:

$$P_{\text{кв}} = P_1 \cdot n = 5,1 \cdot 12 = 61,2 \text{ кВт}$$

Удельная установленная мощность обогрева равна:

$$\Delta P_{\text{уд}} = \frac{P_1}{F} = \frac{5,1 \cdot 10^3}{1,06 \cdot 1,6 \cdot 20} = 150 \text{ Вт/м}^2$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитайте нагревательное устройство для парника в помощь нагревательного провода. Размеры парника: ширина $B = 12$ м; длина $L = 1,5$ м.

Удельные потери через остекление $\alpha = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Потери мощности в грунт составляют 20 % потерь через остекление. Определите число нагревательных элементов, длину провода на один нагреватель и на все нагревательное устройство. Рассчитайте укладку проводов в парнике. Разработайте схему соединения. Напряжение питания нагревательного устройства $U = 65 \text{ В}$. Перепад температур между наружным воздухом и воздухом парника $\Delta t = 25 ^\circ\text{С}$. Расчет проведите с использованием нагревательного провода ПОСХП.

2. Определите установленную мощность электрокалориферов весенней пленочной теплицы, формы и размеры которой даны на рисунке 8.5 ($R = 2 \text{ м}$; $L = 10 \text{ м}$). Температура наружного воздуха $t_{\text{нар}} = \text{минус } 16 ^\circ\text{С}$. Внутренняя температура $t_{\text{вн}} = 16 ^\circ\text{С}$. Кратность воздухообмена $K_0 = 2,0 \text{ ч}^{-1}$. Коэффициент теплоотдачи через пленку $\alpha_{\text{сп}} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Потери в грунт составляют 10 % от потерь через пленку. Плотность воздуха при температуре $20 ^\circ\text{С}$ $\gamma_6 = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$. Удельная массовая теплоемкость воздуха $c_6 = 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$. Определите время разогрева теплицы от температуры окружающей среды до внутренней, если разогрев теплицы осуществляется без вентиляции.

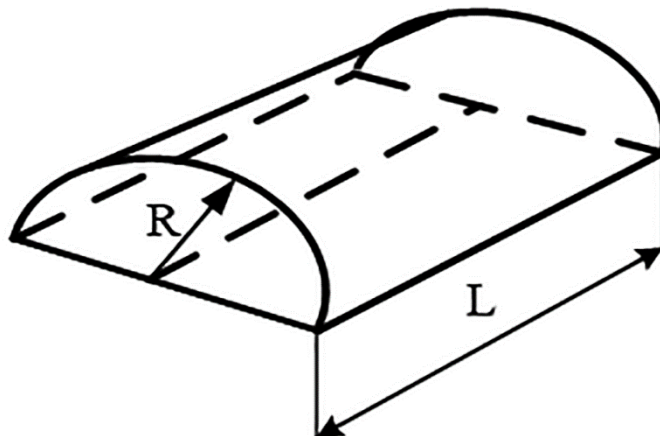


Рисунок 8.5 – Общий вид теплицы

3. Определите диаметр стальной оцинкованной проволоки и мощность, необходимую для обогрева квартала из 8 20-рамных парников. Стальная проволока для обогрева почвы и воздуха расположена в асбоцементных трубах

диаметром 0,12 м. Напряжение сети 380/220 В. Температура воздуха в парнике 16 °С, расчетная температура наружного воздуха 5,6 °С, скорость ветра 4 м/с.

Контрольные вопросы

1. Какими средствами осуществляется обогрев почвы в сооружениях защищенного грунта?
2. Какие составляющие учитываются в уравнении теплового баланса теплицы?
3. Каково устройство обогрева почвы в теплице с помощью нагревательных проводов и кабелей?
4. Каким образом обеспечивается электробезопасность в сооружениях защищенного грунта при использовании электрической энергии для обогрева?
5. Дайте пояснения к электрической принципиальной схеме управления почвенным обогревом.
6. Какими средствами осуществляется обогрев воздуха в теплице?
7. Каковы основные технические характеристики нагревательных проводов и кабелей?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

1. Что не является формулой для определения тепловых потерь электро-термической установки?

1. $Q = Q_k + Q_T + Q_n$.

2. $Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t$.

3. $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$.

4. $Q = m' \cdot c \cdot \Delta t$.

2. Что не является формулой для определения полезной теплоты электро-термической установки?

1. $Q = m \cdot a_{пл}$.

2. $Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t$.

3. $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$.

4. $Q = m \cdot (i_2 - i_1)$.

3. Тепловой поток, проходящий через слой теплоизоляции, определяется:

1. Коэффициентом теплопроводности.

2. Коэффициентом теплоотдачи.

3. Приведенным коэффициентом излучения.

4. Электропроводностью.

4. Каким параметром характеризуется ЭТУ непрерывного действия?

1. Временем нагрева.

2. Производительностью по нагреваемому материалу.

3. Массой нагреваемого материала.

4. Удельным расходом тепловой энергии.

5. Что не является характеристикой ЭТУ периодического действия?

1. Время нагрева.

2. Производительность по нагреваемому материалу.

3. Масса нагреваемого материала.

6. Укажите формулу для определения полезной мощности ЭТУ непрерывного действия:

1. $P = \frac{q}{3600 \cdot \tau}$.

2. $P = \frac{q - q_{\text{пот}}}{3600 \cdot \tau}$.

3. $P = \frac{q - q_{\text{пот}}}{3600}$.

3. $P = \frac{q}{3600}$.

7. Как определяется установленная мощность ЭТУ периодического действия?

1. $P = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600 \cdot \tau \cdot \eta_{\text{T}}}$.

2. $P = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600 \cdot \tau \cdot \eta_{\text{T}}} \cdot K_{\text{з}}$.

3. $P = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600 \cdot \tau} \cdot K_{\text{з}}$.

4. $P = \frac{Q_{\text{пол}}}{3600 \cdot \eta_{\text{T}}} \cdot K_{\text{з}}$.

8. Что представляет собой вентиляционная норма помещения?

1. Часовой расход воздуха.

2. Производительность одного вентилятора.

3. Число раз полной замены воздуха в помещении за час.

4. Суммарный воздухообмен по условию удаления всех вредных примесей из помещения.

9. Какой способ нагрева применяют в электрокалориферах?

1. Косвенный нагрев сопротивлением.

2. Индукционный.

3. Диэлектрический.

4. Прямой нагрев сопротивлением.

10. Что такое кратность воздухообмена в помещении?

1. Часовой расход воздуха.
2. Производительность одного вентилятора.
3. Число раз полной замены воздуха в помещении за час.
4. Суммарный воздухообмен по условию удаления всех вредных примесей из помещения.

11. Как изменится мощность шести нагревателей при переключении их с последовательной звезды на параллельную?

1. Уменьшится в четыре раза.
2. Уменьшится в два раза.
3. Увеличится в два раза.
4. Увеличится в четыре раза.

12. От чего зависит электрический КПД ЭТУ?

1. Способа преобразования электрической энергии в тепловую.
2. Мощности нагревательной установки.
3. Линейных размеров ЭТУ.
4. Времени нагрева.

13. Каким свойством должен обладать материал нагревательного элемента?

1. Малой плотностью.
2. Большой электропроводностью.
3. Большим удельным сопротивлением.
4. Высокой теплопроводностью.

14. Какова причина выхода из строя элементных водонагревателей при их включении в сеть без воды?

1. Увеличивается потребляемая мощность.
2. Короткое замыкание.
3. Увеличивается теплоотдача трубчатых электронагревателей (ТЭН).
4. Уменьшается теплоотдача трубчатых электронагревателей (ТЭН).

15. От чего не зависит термический КПД ЭТУ?

1. От линейных размеров ЭТУ.
2. От мощности нагревательной установки.
3. От способа преобразования электрической энергии в тепловую.
4. От толщины тепловой изоляции.

16. Как зависит удельное сопротивление воды от температуры?

1. Прямо пропорционально.
2. Обратно пропорционально.
3. Экспоненциально.
4. Не зависит.

17. Какова схема замещения коаксиальной электродной системы?

1. Звезда.
2. Треугольник.
3. Зависит от материала корпуса.
4. Звезда и треугольник.

18. За счет чего происходит нагрев материала в установках диэлектрического нагрева?

1. Вихревыми токами.
2. За счет теплопередачи.
3. Токами высокой частоты.
4. За счет прохождения тока по проводнику.

19. За счет чего происходит нагрев материала в индукционных нагревательных установках прямого действия?

1. Вихревыми токами.
2. За счет теплопередачи.
3. Токами высокой частоты.
4. За счет теплопроводности.

20. Каково назначение наполнителя в ТЭН?

1. Для ухудшения теплопроводности.
2. Для улучшения электропроводности.
3. Для обеспечения механической прочности трубки.
4. Для повышения КПД.

21. Выберите из предложенных вариантов ТЭН для нагрева воды:

1. ТЭН-240Д16/2,5 К 220.
2. ТЭН-60А13/0,5 Э 220.
3. ТЭН-60А13/1,6 И 220.
4. ТЭН-32А10/0,4 Р 220.

22. Выберите из предложенных вариантов ТЭН для нагрева воздуха:

1. ТЭН-170Б13/2 О 220.
2. ТЭН-60А13/0,5 Э 220.
3. ТЭН-32А10/0,4 Р 220.
4. ТЭН-32А10/0,4 Р 220.

23. Выберите из предложенных вариантов конвективные средства обогрева:

1. Электрообогреваемые полы, коврики.
2. Электрорадиаторы, электрообогреваемые панели.
3. ИКУФ, ЭИС, ЛИКИ.
4. Электрокалориферы, электрообогреваемый пол, ЛИКИ.

24. При расчетах нагревательных элементов из какого материала учитывается влияние поверхностного эффекта?

1. Нихром.
2. Сталь.
3. Графит.
4. Медь.

25. Каково соотношение сопротивлений постоянному и переменному токам в стальных нагревательных элементах?

1. Сопротивление постоянному току больше сопротивления переменному току.
2. Сопротивление постоянному току равно сопротивлению переменного тока.
3. Сопротивление постоянному току меньше сопротивления переменному току.
4. Зависит от частоты тока.

26. Каково соотношение сопротивлений постоянному и переменному токам в нагревательных элементах из специальных сплавов?

1. Сопротивление постоянному току больше сопротивления переменному току.
2. Сопротивление постоянному току равно сопротивлению переменного тока.
3. Сопротивление постоянному току меньше сопротивления переменному току.
4. Зависит от частоты тока.

27. Что такое поверхностный эффект?

1. Затухание плотности тока от поверхности вглубь материала.
2. Увеличение амплитуды колебания электромагнитной волны при проникновении вглубь материала.
3. Явление, при котором электрический ток протекает только во внутренних слоях проводника.

4. Снижение удельной поверхностной мощности нагрева при уменьшении напряжения питания.

28. Как можно регулировать глубину проникновения вихревых токов в материал при индукционном нагреве?

1. Изменением величины воздушного зазора между индуктором и нагреваемой деталью.
2. Изменением напряжения питающей сети.
3. Изменением частоты питающей сети.
4. Изменением числа витков индуктора.

29. В каком диапазоне частот работают индукционные нагревательные установки средней частоты?

1. До 0,5 МГц.

2. До 10 кГц.

3. До 100 кГц.

4. Свыше 10 МГц.

30. Какой способ нагрева используется для поверхностной закалки стальных заготовок?

1. Индукционный.

2. Термоэлектрический.

3. Диэлектрический.

4. Электронный.

31. Из предложенных вариантов выберете группу элементных водонагревателей:

1. ЭПЗ, ВЭТ, КЭВ.

2. УНС, УАП, САОС.

3. ЭПЗ, КЭВ, КЭПР.

32. Каким образом регулируется мощность в электродных водонагревателях?

1. Изменением схемы соединения.

2. Изменением числа нагревательных элементов.

3. Изменением объема воды, охваченной током.

4. Изменением частоты питающей сети.

33. При нагреве металлических заготовок каким способом коэффициент полезного действия будет выше?

1. Электроконтактный.

2. Индукционный.

3. Электродуговой нагрев.

4. Диэлектрический.

34. Что такое постоянная времени нагрева?

1. Время нагрева электротермической установки до конечной заданной температуры.

2. Время нагрева электротермической установки до установившейся температуры без учета потерь в окружающую среду.

3. Время нагрева электротермической установки до конечной заданной температуры без учета потерь в окружающую среду.

4. Время нагрева электротермической установки до конечной заданной температуры без учета потерь в окружающую среду.

35. От какой из указанных характеристик материала не зависит интенсивность диэлектрического нагрева?

1. Диэлектрическая проницаемость.

2. Тангенс угла потерь.

3. Теплопроводность.

4. Напряжение питания.

36. У какого из перечисленных материалов коэффициент поглощения мощности при индукционном нагреве наибольший?

1. Медь.

2. Сталь.

3. Алюминий.

4. Нихром.

37. Из какого материала изготавливают спирали трубчатых электронагревателей (ТЭН)?

1. Сталь.

2. Никелин.

3. Манганин.

4. Нихром.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию / И. И. Алиев. – М. : Высшая школа, 2002. – 255 с.
2. Альтгаузен, А. П. Электротермическое оборудование / А. П. Альтгаузен. – М. : Энергия, 2000. – 416 с.
3. Гайдук, В. Н. Практикум по электротехнологии / В. Н. Гайдук, В. Н. Шмигель. – М. : Агропромиздат, 1999. – 175 с.
4. Малин, Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Н. И. Малин. – М. : Колос, 2004. – 386 с.
5. Сибикин, Ю. Д. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / Ю. Д. Сибикин. – М. : Академия, 2004. – 304 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Таблица А.1 – Теплотехнические данные некоторых материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Примечание
Воздух	1,21	1,01	0,025	–
Азот	1,25	1,02	0,024	–
Вода	1 000	4,19	0,600	$a_n = 2\,260$
Молоко	1 028	3,92	0,590	–
Ацетон	791	2,18	0,174	$a_n = 524$
Спирт	791	2,43	–	$a_n = 1\,190$
Лед	916	2,10	2,300	$a_n = 334$
Снег	200–410	2,00	0,100–0,470	–
Дерево	600–8 000	2,40–2,70	0,140–0,410	–
Зерно	1 200–1 400	1,55	0,130–0,200	$T_\delta = 323$
Корнеплоды	880–1 080	3,50–4,10	–	–
Солома	120	1,46	0,046–0,150	–
Бетон	1 600	0,84	0,840	$T_\delta = 673$
Шлакобетон	1 500	0,80	0,700	–
Стекловата	200	0,67	0,037	$T_\delta = 723$
Вермикулит	150	0,63	0,100	$T_\delta = 423$
Красный кирпич	1 700	0,88	0,755	–
Асбест	770	0,82	0,116	$T_\delta = 523$
Шамот	2 600	0,88	0,700	$T_\delta = 1\,623$
Сталь	7 800	0,46	44–60	$a_{пл} = 205$
Трансформа- торное масло	880	1,67	0,110	–
Примечания: a_n – удельная теплота парообразования, кДж/кг; $a_{пл}$ – удельная теплота плавления, кДж/кг; T_δ – предельно допустимая температура нагрева, К.				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ПАРАМЕТРЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ
Таблица Б.1 – Технические характеристики нагревательных проводов и кабелей

Параметр	Ед. изм.	Марка провода				
		ПОСХВ	ПОСХП	ПОСХВТ	ПСО	КМНС
Диаметр жилы	мм	1,1	1,1	1,4	4–6	3×1
Диаметр провода с изоляцией	мм	2,9	2,3	3,4	–	–
Коэффициент теплопроводности изоляции	Вт/(м·К)	0,17	0,3	0,2	–	–
Допустимая температура	°С	70	90	105	130	250
Линейное сопротивление	Ом·м	0,174	0,194	0,120	0,016	–
Линейная мощность	Вт/м	5–7	7,9	9–11	45	100
Линейное напряжение	В/м	1,37	1,37	1,22	0,50	–
Термическое сопротивление	К/Вт	0,88	0,37	0,70	–	–
Срок службы	тыс. ч	12	12	12	300	2 000

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОКЛИМАТА
В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Таблица В.1 – Требования к параметрам микроклимата животноводческих и птицеводческих помещений

Помещение	Вид животных и птицы	Содержание	Оптимальная температура воздуха в помещении, °С	Оптимальная относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	Минимальный воздухообмен на 100 кг массы животного, м ³ /ч
Коровник	взрослый скот	в стойлах	5	85	0,5	17
Телятник	молодняк	беспривязное в стойлах	5	75	0,5	17
Родильное отделение	нетели и коровы	беспривязное в стойлах	10	70	0,3	20
Свинарник	откормочные свины	свободно-выгульное	14	75	0,1	20
Свинарник	ремонтный молодняк и поросят-отъемыши	свободно-выгульное	16	70	0,4	15
Свинарник-маточник	свиноматки	станко-выгульное	16	70	0,3	15
Птичник	куры	в клетках	16	70	0,3	100-200
Птичник	куры	на полу	14	65	0,3	100-200
Птичник	молодняк птицы	на полу	22	60	0,3	100-200
Птичник	молодняк птицы	клеточное	20	65	0,3	100-200

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ ПОМЕЩЕНИЙ

Таблица Г.1 – Удельный объем помещения при содержании различных видов и групп животных

Группа животных	Минимальный объем воздуха внутри помещения на одну голову, м³/гол
Коровы, волы, лошади	17
Свиноматки	15
Телята	10
Свиньи взрослые	6
Свиньи ремонтный молодняк	3,5
Взрослое поголовье птиц	0,3–0,4

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
НОРМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЖИВОТНЫХ

Таблица Д.1 – Нормы выделения животными теплоты, углекислоты и водяных паров

Вид животных	Живая масса, кг	Нормы выделений на одну голову		
		потока свободной теплоты, Вт	углекислоты, л/ч	водяных паров, г/ч
Коровы стельные сухостойные и нетели за 2 месяца до отела	300	556	100	319
	400	662	119	380
	600	853	153	489
Коровы лактирующие при уровне лактации 10 л	300	593	106	340
	400	704	126	404
	500	793	142	455
	600	880	158	505
Телята в возрасте до 1 месяца	50	159	29	92
	80	235	42	135
Телята в возрасте от 1 до 3 месяцев	60	198	35	113
	100	309	56	177
	130	351	63	202
Телята в возрасте от 3 до 4 месяцев	120	340	61	195
	150	351	63	202
	200	463	89	265
Молодняк от 4 месяцев и старше	180	377	68	216
	250	456	82	264
	350	599	107	344
Свиноматки подсосные с поросятами	100	488	88	282
	150	558	100	320
	200	646	115	370
Ремонтный и откормочный молодняк	50	155	28	89
	80	215	39	124
	120	263	47	151
Взрослые свиньи на откорме	100	265	48	153
	200	351	63	202
<i>Нормы выделений взрослой птицы (на 1 кг живой массы)</i>				
Куры яичных пород	1,6	6,8	1,54	4,50
Куры мясных пород	3,2	5,9	1,44	3,75

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
**КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ЖИВОТНЫМИ**
Таблица Е.1 – Поправочные коэффициенты для определения тепловыделения животных при различных температурах воздуха в помещении

Температура воздуха в помещении, °С	Коэффициенты для определения количества			
	свободной теплоты в помещении		водяных паров в помещении	
	для КРС	для свиней	для КРС	для свиней
-5	1,43	1,59	0,67	0,72
0	1,21	1,25	0,76	0,85
+5	1,12	1,08	0,86	0,98
+10	1,00	1,00	1,00	1,00
+15	0,85	0,86	1,24	1,13
+20	0,62	0,67	1,70	1,50

Таблица Е.2 – Поправочные коэффициенты для определения тепловыделения взрослой птицы при различных температурах воздуха в помещении

Температура воздуха в помещении, °С	Коэффициенты для определения количества	
	свободной теплоты	водяных паров
8	1,10	0,90
12	1,05	0,90
16	1,00	1,00
20	1,00	1,00
24	1,05	1,05
28	1,10	1,22

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

НОРМЫ МЕСТНОГО ОБОГРЕВА ЖИВОТНЫХ

Таблица Ж.1 – Нормы местного обогрева

Вид животных	Рекомендуемая температура пола, °С	Удельная мощность, Вт/м²	Удельная обогреваемая площадь пола, м²/гол.
Коровы дойные	10–13	150–190	1–1,5
Свиноматки	18–20	80–150	2,0–2,5
Поросята откормочные	15–20	90–150	2,0–2,5
Ремонтный молодняк свиней	25	90–150	1,5–2,0
Телята	13–15	150–190	1–1,5

ПРИЛОЖЕНИЕ И
ЭЛЕКТРОКАЛОРИФЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

Таблица И.1 – Технические данные электрокалориферных установок типа СФОА

Показатели	Марка установки				
	СФОА-16/0,5 ТЦ М2/1	СФОА-25/0,5 ТЦ М2/1	СФОА-40/0,5 ТЦ М2/1	СФОА-60/0,5 ТЦ М2/1	СФОА-100/0,5 ТЦ М2/1
Полная мощность установки, кВт	16,7	23,2	45,5	69,0	94,0
Мощность электрокалорифера, кВт	15,0	22,5	45,0	67,0	90,0
Общее количество нагревателей, шт.	18	27	36	45	54
Число нагревательных секций	2	3	3	3	3
Средняя мощность нагревательной секции, кВт	7,5	7,5	15,0	22,5	30,0
Производительность по воздуху, м ³ /ч при перепаде температуры нагреваемого воздуха 50 °С	950	1 480	2 480	3 580	5 940
Свободный напор, Па·10 ⁵	35	35	65	85	75

Таблица И.2 – Технические данные электрокалориферных установок типа СФОЦ

Показатели	Марка установки						
	СФОЦ-5/0,5Т	СФОЦ-10/0,5Т	СФОЦ-16/0,5Т	СФОЦ-25/0,5Т	СФОЦ-40/0,5Т	СФОЦ-60/0,5Т	СФОЦ-100/0,5Т
Мощность, кВт	5,05	9,85	15,75	23,25	46,50	69,00	94,00
Мощность электрокалорифера, кВт	4,8	9,6	15,0	22,5	45,0	67,5	90,0
Число нагревательных секций	1	2	2	3	3	3	3
Мощность одной нагревательной секции, кВт	4,8	4,8	7,5	7,5	15,0	22,5	30,0

Продолжение таблицы И.2

Показатели	Марка установки						
	СФОЦ-5/0,5Г	СФОЦ-10/0,5Г	СФОЦ-16/0,5Г	СФОЦ-25/0,5Г	СФОЦ-40/0,5Г	СФОЦ-60/0,5Г	СФОЦ-100/0,5Г
Подача воздуха, м ³ /с	0,22–0,33	0,22–0,23	0,44–0,77	0,44–0,77	0,66–1,20	0,90–1,60	1,25–2,50
Перепад температуры нагреваемого воздуха, °С	22–32	30–45	20–30	30–45	30–50	32–56	30–51
Аэродинамическое сопротивление электрокалорифера, Па	70	80	250	250	250	250	250

ПРИЛОЖЕНИЕ К
ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Таблица К.1 – Характеристики материалов нагревательных элементов

Материал	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, $\times 10^{-6}$ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления при 1 000 °С, °С ⁻¹	Допустимая рабочая температура, °С	
			оптимальная	максимальная
Фехраль Х13Ю4	1,18–1,34	0,000140	900	950
Фехраль Х23Ю5	1,30–1,40	0,000076	1 175	1 200
Фехраль Х27Ю5Т	1,37–1,47	0,000076	1 300	1 350
Нихром Х15Н60	1,06–1,16	0,000083	950	1 000
Нихром Х15Н60-Н	1,07–1,17	0,000105	1 050	1 100
Нихром Х20Н80	1,04–1,15	0,000028	1 050	1 100
Нихром Х20Н80-Н	1,06–1,17	0,000025	1 150	1 200
Хромникельалюминий ХН70Ю	1,25–1,35	0,000016	1 200	1 250
Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т	0,71	0,0000166	800	850
Константан	0,50	0,000005	400	450
Сталь малоуглеродистая	0,135	0,00450	280	300
Карборунд	800–900	переменный	1 400	1 500
Графит	8–13	переменный	1 850	2 000

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

ТАБЛИЦА НАГРУЗОК НИХРОМОВОГО ПРОВОДА

Таблица Л.1 – Сила тока нихромовой проволоки, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе при температуре 20 °С

Диаметр проволоки, мм	Площадь сечения, мм ²	Сила тока, А при температуре проволоки, °С						
		200	400	600	700	800	900	1 000
0,30	0,071	1,05	1,63	2,27	2,70	3,05	3,40	3,85
0,35	0,096	1,27	1,95	2,76	3,30	3,75	4,15	4,75
0,40	0,126	1,50	2,34	3,30	3,85	4,40	5,00	5,70
0,45	0,159	1,74	2,75	3,90	4,45	5,20	5,85	6,75
0,50	0,196	2,00	3,15	4,50	5,20	5,90	6,75	7,70
0,55	0,238	2,25	3,55	5,10	5,80	6,75	7,60	8,70
0,60	0,283	2,52	4,00	5,70	6,50	7,50	8,50	9,70
0,65	0,332	2,82	4,40	6,30	7,15	8,25	9,30	10,75
0,70	0,385	3,10	4,80	6,95	7,80	9,10	10,30	11,80
0,75	0,442	3,40	5,30	7,55	8,40	9,95	11,25	12,85
0,80	0,503	3,70	5,70	8,15	9,15	10,8	12,30	14,0
0,90	0,636	4,25	6,70	9,35	10,45	12,3	14,50	16,5
1,00	0,785	4,85	7,70	10,8	12,10	14,3	16,80	19,2
1,1	0,95	5,40	8,70	12,4	13,90	16,5	19,10	21,5
1,2	1,13	6,00	9,80	14,0	15,80	18,7	21,60	24,3
1,3	1,33	6,60	10,90	15,6	17,80	21,0	24,40	27,0
1,4	1,54	7,25	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,5	1,77	7,90	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,6	2,01	8,6	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,8	2,54	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
2,0	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
2,5	4,91	16,6	27,5	40,0	46,6	57,5	66,5	73,0
3,0	7,07	22,3	37,5	54,5	64	77	88	102
4,0	12,6	37	60	80	93	110	129	151
5,0	19,6	52	83	105	124	146	173	206

ПРИЛОЖЕНИЕ М
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Таблица М.1 – Допустимые значения удельной поверхностной мощности для ТЭН

Обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Материал оболочки (трубки)	Допустимая поверхностная мощность, Вт/см ²
П	вода, слабый раствор щелочей и кислот	нагрев, кипячение	нержавеющая сталь	11
Р			углеродистая сталь	11
Х			медь, латунь	7
Т	воздух, газы, смеси газов	нагрев в неподвижной воздушной среде до температуры на оболочке от 450 до 700 °С	нержавеющая сталь	5
С	То же	то же, до 450 °С	углеродистая сталь	2,2
О	воздух, газы, смеси газов	нагрев в подвижной воздушной (скорость не менее 6 м/с) среде до температуры на оболочке 450 °С	углеродистая сталь	5,5
К	то же	то же, до температуры на оболочке от 450 до 600 °С	нержавеющая сталь	6,5
Э	то же	нагрев в подвижной (скорость менее 6 м/с) среде до температуры на оболочке 450 °С	углеродистая сталь	5,1
И	пищевые жиры и минеральные масла	нагрев в сосудах, ваннах до температуры на оболочке 300 °С	углеродистая сталь	3

Таблица М.2 – Характеристика наполнителей трубки ТЭН

Наполнитель	Рабочая температура ТЭН, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Температура размягчения, °С
Периклаз	700	1,5	2 800
Электрокорунд	700	1,4	3 000
Кварцевый песок	400	1,0	1 700

Таблица М.3 – Технические данные трубчатых электронагревателей (ТЭН)

Тип электронагревателя	Номинальная мощность одного элемента, кВт	Номинальное сопротивление, Ом	Удельная поверхностная мощность, Вт/см ²	Активная длина, мм
<i>Для нагрева воды, слабых растворов кислот и щелочей</i>				
ТЭН-32А10/0,4Р220	0,4	120,88	5,30	240
ТЭН-32А13/1Р220	1,0	48,35	10,21	240
ТЭН-120Б13/2Р220	2,0	24,20	4,58	1 070
ТЭН-140Б13/3,15Р220	3,15	15,36	6,08	1 270
ТЭН-200Б13/4Р220	4,0	12,10	5,24	1 870
ТЭН-60А13/0,8Р220	0,8	60,44	5,77	520
ТЭН-60А13/1,6Р220	1,6	30,26	7,54	700
ТЭН-120Б13/2,5Р220	2,5	19,37	5,72	1 070
<i>Для нагрева воздуха, газов и смесей газов</i>				
ТЭН-60А13/0,5Э220	0,5	96,92	2,36	520
ТЭН-78А13/1О220	1,0	48,40	3,50	700
ТЭН-170Б13/2О220	2,0	24,20	3,12	1 570
ТЭН-240Д16/2,5К220	2,5	19,37	2,39	2 080
ТЭН-60А13/0,8О220	0,8	60,44	3,77	520
ТЭН-120Б13/1,6О220	1,6	30,26	3,92	1 000
ТЭН-120Г13/1,25О380	1,25	115,50	3,22	950
ТЭН-60Б13/0,4С220	0,4	120,88	2,08	470

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Таблица Н.1 – Характеристики инфракрасных излучателей

Тип источника ИК излучения	Мощность, Вт	Диапазон излучения, нм	КПД источника	Срок службы, тыс. ч
ИКЗК 215-225-250	250	750–2 500	0,81	6
ИКЗС 215-225-250	250	750–2 500	0,66	6
ИКЗ 215-225-500	500	750–2 500	0,82	6
КГ 220-1000	1 000	750–2 500	0,80	5
ТЭН	250–800	1 400–10 000	0,30	10

ПРИЛОЖЕНИЕ П

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Таблица П.1 – Технические данные высокочастотных генераторов

Тип	Назначение	Номинальная колебательная мощность, кВт	Рабочая частота, кГц	Мощность, потребляемая из сети, кВт
ВЧГ3-4/1,76	поверхностная закалка	4	1 760	6
ВЧГ1-6/0,44		6	440; 880	10
ВЧГ1-25/0,44		25	440	40
ВЧГ1-60/0,066		60	66	80
ВЧГ2-60/0,44	поверхностная закалка, сквозной нагрев прутков и деталей	60	440	80
ВЧГ1-100/0,066		100	66	130

Таблица П.2 – Выделенные частоты для нагрева в электрическом поле высокой частоты

Диапазон	Выделенные частоты
Средневолновый диапазон, кГц	440±2,5 %
	80±1,0 %
	1 760±2,5 %
Коротковолновый диапазон, МГц	5,28±2,5 %
	13,56±1,0 %
	27,12±1,0 %
Метровый диапазон, МГц	40,68±1,0 %
	81,36±1,0 %
	152,5±1,0 %
	300,0±1,0 %

Таблица П.3 – Технические данные высокочастотных генераторов для УДН

Тип генератора	Номинальная мощность (колебательная), кВт	Рабочая частота, МГц	Номинальное напряжение (анодное), кВ	Мощность, потребляемая из сети, кВт
ВЧГ3-10/13	10	13,56	7,5	18,5
ВЧГ3-60/13	60	13,56	10,0	85
ВЧГ1-160/13	160	13,56	10,5	300
ВЧГ4-4/27	4	27,12	6,0	7
ВЧГ2-10/27	10	27,12	7,5	20
ВЧГ2-25/27	25	27,12	7,5	38

Учебное издание

Проценко Палина Павловна, доцент

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Подписано в печать 15.04.2024 г.
Формат 60x90/16. Уч.-изд. л – 5,18. Усл. печ. л. – 10,06.
Тираж по требованию. Заказ 80.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

