

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

**И. В. Юдаев, С. В. Машков, М. Р. Фатхутдинов**

## **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ**

*Учебное пособие содержит сведения, необходимые  
для формирования профессиональных компетенций при подготовке  
бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия»,  
и рекомендуется Научно-методическим советом по технологиям,  
средствам механизации и энергетическому оборудованию  
в сельском хозяйстве Федерального УМО по сельскому, лесному  
и рыбному хозяйству для использования в учебном процессе*

Кинель 2018

УДК 621.3

Ю16

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой

«Электрооборудование и электротехнологии в АПК»

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет им. В. Я. Горина»

*С. В. Вендин;*

д-р техн. наук, проф., руководитель научного направления

«Энергообеспечение в АПК»

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

*А. Н. Васильев*

**Юдаев, И. В.**

**Ю16** Расчет электротермических процессов и оборудования : учебное пособие / И. В. Юдаев, С. В. Машков, М. Р. Фатхутдинов. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2018. – 218 с.

**ISBN 978-5-88575-541-2**

В пособии представлены общие сведения и положения из теории преобразования электрической энергии в тепловую, а также методы расчёта и выбора нагревателей и электротермического оборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве. Подробно рассмотрены примеры теплотехнических расчетов, а также расчетов электрических нагревателей и электротермического оборудования.

Предназначено для подготовки бакалавров и магистров по направлениям 35.03.06 и 35.04.06 «Агроинженерия». Учебное издание рассчитано на преподавателей, студентов и специалистов в области электрификации сельского хозяйства, электрического нагрева и электротехнологии.

УДК 621.3

**ISBN 978-5-88575-541-2**

© ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2018

© Юдаев И. В., Машков С. В., Фатхутдинов М. Р., 2018

# Предисловие

Учебное пособие разработано в соответствии с основными разделами Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Цель пособия – закрепить студентами учебный материал, развить способность и готовность производить расчеты электротермических процессов и оборудования.

Учебное пособие содержит 9 разделов, в которых отражаются необходимые для расчетов теоретические сведения, графический материал. В конце каждого раздела приведены контрольные задания и вопросы для самостоятельного контроля изученного материала.

В процессе выполнения заданий обучающиеся изучают положения теории преобразования электрической энергии в тепловую, а также учатся применять методы расчёта и выбора нагревателей и электротермического оборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве.

В процессе изучения учебного пособия у обучающихся должны формироваться следующие профессиональные компетенции:

- готовность к участию в проведении исследований рабочих и технологических процессов машин;
- готовность к профессиональной эксплуатации машин и технологического оборудования и электроустановок;
- способность и готовность организовать на предприятиях агропромышленного комплекса высокопроизводительное использование и надежную работу сложных технических систем для производства, хранения, транспортировки и первичной переработки продукции растениеводства и животноводства;
- способность и готовность рассчитывать и оценивать условия и последствия (в том числе экологические) принимаемых организационно-управленческих решений в области технического и энергетического обеспечения высокоточных технологий производства сельскохозяйственной продукции;
- способность проведения инженерных расчетов для проектирования систем и объектов.

# Введение

Под электротехнологией понимают область науки и техники, охватывающей изучение, исследование и применение таких технологических процессов, в которых непосредственно участвует электрическая энергия, преобразуясь в рабочем пространстве в различные другие виды энергии, например: тепловую, химическую, механическую и т.п. Во многих процессах, где применяется электрическая энергия, электрический ток является не просто энергоносителем, но также и инструментом воздействия на материалы, объекты, среду, продукты обработки.

Установки, в которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды с одновременным и непосредственным её использованием в технологических процессах, называют *электротехнологическими*. К ним относятся: электрические печи и электронагревательные установки, электросварочное оборудование всех видов, электросепараторы, аппараты для размерной электрофизической и электрохимической обработки металлов и т.п.

Методы электротехнологии отличаются высокой эффективностью, универсальностью и возможностью применения их для непосредственного воздействия на различные объекты, в том числе и на живые организмы и среду их обитания. При этом улучшается качество обрабатываемых материалов и продуктов, повышается продуктивность растений и животных, улучшается производственная среда.

Принято разделять электротехнологические процессы и соответствующие им электроустановки на следующие классы:

- электротермические процессы и установки, в которых используется превращение электрической энергии в тепловую для нагрева сред, материалов и изделий в целях изменения их свойств, характеристик или формы, а также для их плавления и испарения;
- электросварочные процессы и оборудование, в котором получаемая из электрической энергии тепловая энергия используется для нагрева тел в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной однородности материала или материалов в месте сварки;

– электрофизические процессы и установки, в которых для воздействия на материалы используется превращение электрической энергии в механическую, тепловую и другие виды энергии;

– электрохимические процессы и установки, в которых с помощью электрической энергии осуществляется разложение химических соединений или их разделение путем перемещения заряженных частиц (ионов) в жидкой среде под действием электрического поля;

– аэрозольные технологии, при которых энергия электрического поля используется для сообщения электрического заряда взвешенным в газовом потоке мелким частицам вещества с целью перемещения их под действием электрического поля в нужном направлении и т.п.

Термин *«электротехнологические установки (оборудование)»* включает в себя агрегаты, в которых осуществляются электротехнологические процессы, а также вспомогательные электротехнические аппараты и приборы (источники питания, устройства защиты, управления и др.).

*Электрический нагрев или электротермия* – раздел науки и технологии, изучающей преобразование электроэнергии в термическую энергию для полезных целей (СТ МЭК 50(841)-83).

*Электронагревательным* называется устройство, в котором электрическая энергия непосредственно или за счет косвенных преобразований превращается в тепловую энергию.

# 1. Основы теплового расчета электротермических установок

## 1.1. Общие положения из теории массо- и теплопередачи

В процессе теплообмена, при тепловом воздействии одного, более нагретого тела, на другое, менее нагретое, внутренняя энергия первого тела уменьшается, а второго, в соответствии с законом сохранения энергии, – настолько же увеличивается. При протекании этого процесса теплота, в соответствии со вторым началом термодинамики, самопроизвольно переходит от более нагретого тела к менее нагретому.

Процесс теплообмена протекает тем интенсивнее, чем выше разность температуры тел, обменивающихся теплотой. При отсутствии разности температур, процесс теплообмена прекращается, и наступает тепловое равновесие тел.

Различают три способа распространения и передачи тепла в природе: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение (лучеиспускание) и два вида теплообмена между телами: конвективный и лучистый. Элементарные виды теплопередачи (теплопроводность, конвекция и тепловое излучение) в чистом виде встречаются крайне редко, поэтому обычно один вид теплообмена сопряжен с другими видами и это определяет протекание сложного типа теплообмена.

*Теплопроводность* представляет собой процесс передачи теплоты в неравномерно нагретом теле или непосредственно соприкасающихся телах, при котором теплоту переносят микрочастицы веществ, перемещающиеся из областей высокой температуры в области низких температур. В наиболее чистом виде теплопроводность проявляется внутри твёрдых монолитных тел или в очень тонких неподвижных слоях жидкости или газа. Теплота передаётся лишь при наличии разности температур между частями тела, системами тел и т.д., то есть в температурном поле.

На основании гипотезы Фурье тепловой поток  $\Phi$ , Вт, передаваемый, например, через плоскую стенку, определяется как

$$\Phi = \lambda \cdot F \cdot \frac{\Delta t}{\Delta_{cm}} = F \cdot \frac{\Delta t}{R_m}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta t$  – разность температур на поверхностях стенки, через которую осуществляется передача тепла, °С;  $\lambda$  – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·°С);  $\Delta_{cm}$  – толщина стенки, м;  $R_m$  – термическое сопротивление теплопроводности стенки, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $F$  – площадь стенки, через которую осуществляется передача тепла, м<sup>2</sup>.

Термическое сопротивление теплопроводности стенки  $R_m$ , (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, тем больше, чем больше толщина стенки и чем меньше коэффициент теплопроводности материала из которого она изготовлена:

$$R_m = \frac{\Delta_{cm}}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Теплопроводность тел объясняется тепловым движением структурных частиц тела (молекул, атомов, свободных электронов). Лучше проводят теплоту чистые и жидкие металлы, технические сплавы металлов, хуже неметаллические твердые материалы, а органические и неорганические жидкости и газы – плохие проводники теплоты.

Объяснить это достаточно просто. Атомы металлов расположены на определенном расстоянии по отношению один к другому, образуют кристаллическую решетку. Теплота в них передается вследствие колебания кристаллической решетки, но еще в большей мере вследствие хаотичного движения свободных электронов, слабо связанных с атомами и способных от последних отрываться. В результате движения свободных электронов выравнивается температура во всех точках нагреваемого или охлаждаемого металла.

Во многих твердых телах, например строительных или теплоизоляционных материалах, теплота передается теплопроводностью от одних частиц к другим в виде упругих волн только за счет их колебательного движения, в связи с отсутствием в этих материалах свободных электронов.

Теплопроводность пористых материалов по своему значению еще меньше, чем у твердых не проводящих тепло материалов, в связи с тем, что воздух, заполняющий поры, обладает малой теплопроводностью.

Коэффициент теплопроводности порошкообразных и пористых тел тем меньше, чем меньше их плотность, так как у менее

плотного тела больше воздушных пор. Для влажного пористого тела коэффициент теплопроводности значительно больше, чем для сухого тела и воды в отдельности. Материалы с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  меньше  $0,25 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$  относятся к так называемым теплоизоляционным материалам.

Газы и жидкости, органической и неорганической природы, а также их водные растворы – плохие проводники теплоты, обладающие высоким коэффициентом теплопроводности.

С ростом температуры коэффициент теплопроводности газов, теплоизоляционных материалов увеличивается, а металлов и жидкостей – уменьшается.

Полное термическое сопротивление многослойной плоской стенки  $R_{m\Sigma}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев стенки:

$$R_{m\Sigma} = R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mn}. \quad (1.3)$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной плоской стенки  $\lambda_\Sigma$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ :

$$\lambda_\Sigma = \frac{\Delta_{cm\Sigma}}{\frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2} + \dots + \frac{\Delta_{cmn}}{\lambda_n}}, \quad (1.4)$$

где  $R_{m1}, R_{m2}, \dots, R_{mn}$  – термическое сопротивление теплопроводности отдельных слоев плоской стенки,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – теплопроводность материала отдельных слоев плоской стенки,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;  $\Delta_{cm1}, \Delta_{cm2}, \dots, \Delta_{cmn}$  – толщина отдельных слоев плоской стенки, м;  $\Delta_{cm\Sigma}$  – толщина многослойной плоской стенки, м.

Тепловое сопротивление цилиндрической стенки  $R_m$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ :

$$R_m = \frac{1}{2\pi \cdot L \cdot \lambda} \ln \frac{d_n}{d_{вн}}, \quad (1.5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала цилиндрической стенки,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;  $L$  – длина цилиндра (высота стенки), м;  $d_n$  – наружный диаметр цилиндрической стенки, м;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр цилиндрической стенки, м.

Тепловое сопротивление сферической стенки  $R_m$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ :

$$R_m = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \left( \frac{1}{d_{вн}} - \frac{1}{d_n} \right), \quad (1.6)$$



где  $\lambda$  – теплопроводность материала сферической стенки, Вт/(м·°С);  $d_{нар}$  – наружный диаметр сферической стенки, м;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр сферической стенки, м.

*Конвекция* – процесс переноса теплоты текущей жидкостью или газом из области с одной температурой в область с другой температурой. Различают теплоотдачу при вынужденном движении жидкости или газа (вынужденная конвекция) и при свободном движении (естественная конвекция).

Свободная конвекция тем интенсивнее, чем больше разность температур горячих и холодных слоев жидкости или газа, чем больше коэффициент объемного расширения жидкости или газа и чем меньше их кинематический коэффициент вязкости, так как большая вязкость затрудняет возникновение конвективных токов воды или газа.

Свободные конвективные токи, с точки зрения практического применения, не обеспечивают необходимой интенсивности распространения теплоты. Для устранения этого недостатка конвекцию усиливают искусственно за счет применения внешних побудителей – насосов, компрессоров, вентиляторов, дымососов. Поток жидкости или газа по каналам или трубам любой формы, побуждаемый внешней силой, называется вынужденным конвективным потоком, а соответствующее при этом распространение тепла – вынужденной или искусственной конвекцией.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью: при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных частиц с различной температурой. При соприкосновении, например, потока жидкости или газа с более холодной стенкой теплота передается от жидкости или газа к стенке конвекцией и теплопроводностью. Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела одной температуры и потоком жидкости или газа с другой температурой называют *конвективной теплоотдачей*.

Тепловой поток  $\Phi$ , Вт, при конвективном теплообмене между стенкой и потоком жидкости (или газа) рассчитывают по формуле Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = \alpha \cdot F \cdot \Delta t = \alpha \cdot F \cdot (t_c - t_{ж}), \quad (1.7)$$

где  $\Delta t$  – разность температур на стенке  $t_c$  и потока жидкости или газа  $t_{ж}$ , °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Разность температур стенки и жидкости или газа  $\Delta t = (t_c - t_{жс}) = (t_c - t_e)$ , обменивающихся теплотой, называется *температурным напором*.

Коэффициент теплоотдачи конвекции  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), является сложной функцией многих переменных: вида конвекции (естественная или вынужденная), физических свойств жидкости (газа), ее скорости, температуры тела и жидкости, формы и размеров тела и других факторов.

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для различных условий теплообмена получают главным образом экспериментально. Результаты исследований обрабатывают в соответствии с теорией подобия и представляют в виде критериальных уравнений. Например, теплоотдачу от трубчатых нагревателей в поперечном потоке газа описывают уравнением вида:

$$Nu = C \cdot Pr^n \cdot Re^m, \quad (1.8)$$

В уравнение (1.8) входят:

– критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (1.9)$$

– критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (1.10)$$

– критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (1.11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха или газа, Вт/(м·°С);  $v$  – скорость потока воздуха или газа в узком сечении пучка нагревателей, м/с;  $\nu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха или газа, Па·с;  $d$  – размер обтекаемого воздухом тела (диаметр провода или трубки и т.п.), м.;  $a$  – коэффициент температуропроводности воздуха или газа, м<sup>2</sup>/с;  $C$  – постоянная величина;  $m$  и  $n$  – показатели степени, которые зависят от режима обтекания нагревателей воздухом или газом, их размещения и т.п.

Для некоторых простых условий теплообмена коэффициент  $\alpha$  определяют по следующим формулам.

При свободной конвекции:

1) для вертикальных стенок и труб:

$$\alpha = 3,26 \cdot \sqrt[4]{\Delta t}, \quad (1.12)$$

где  $\Delta t$  – температурный напор или разность температур на стенке (трубе)  $t_c$  и потока жидкости или газа  $t_{ж}$ , °C;

2) для горизонтальных стенок и труб, обращенных теплоотдающей поверхностью вверх:

$$\alpha = 2,55 \cdot \sqrt[4]{\Delta t}; \quad (1.13)$$

3) для горизонтальных стенок и труб, обращенных теплоотдающей поверхностью вниз:

$$\alpha = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\Delta t}. \quad (1.14)$$

При вынужденной конвекции простое, прямое определение коэффициента  $\alpha$  достаточно затруднительно, поэтому для технических расчетов зачастую применяют, как уже говорилось ранее, различные критериальные оценки, например: критерий Нуссельта, Рейнольдса и др. При вынужденной конвекции коэффициент  $\alpha$  зависит главным образом от скорости движения среды.

При принудительном движении воздуха вдоль стенки со скоростью более  $v=5$  м/с коэффициент  $\alpha$  можно определить следующим образом:

$$\alpha = 7,12 \cdot v^{0,78}. \quad (1.15)$$

При поперечном обтекании воздухом спиральных проволочных и зигзагообразных ленточных нагревателей определить коэффициент  $\alpha$  можно по следующим формулам:

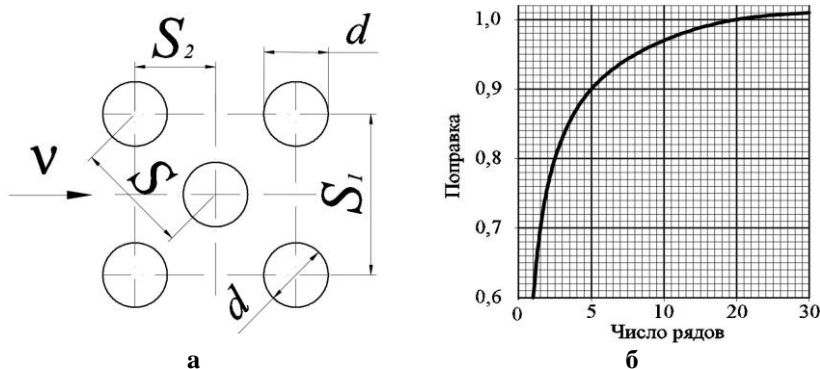
– при числе  $Re \leq 1000$ :

$$\alpha = 10,79 \cdot \frac{\lambda^{0,62} \cdot c^{0,38} \cdot \delta^{0,47} \cdot v^{0,47}}{v^{0,09} \cdot d^{0,53}}, \quad (1.16)$$

– при числе  $Re > 1000$ :

$$\alpha = 2,73 \cdot \frac{\lambda^{0,62} \cdot c^{0,38} \cdot \delta^{0,62} \cdot v^{0,62}}{v^{0,24} \cdot d^{0,38}}, \quad (1.17)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);  $c$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C);  $\delta$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость потока воздуха, м/с;  $\nu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;  $d$  – размер обтекаемого воздухом тела (диаметр провода или трубки и т.п.), м.



**Рис. 1.1. К расчету теплоотдачи трубчатых нагревателей при поперечном обтекании:**

а – схема расположения нагревателей; б – поправка на число продольных рядов

Для случая поперечного обтекания воздухом пучков гладких труб при их «шахматной» компоновке (рис. 1.1, а) коэффициент теплообмена  $\alpha$  можно определить:

– при  $(s_1-d)/(s-d) \geq 0,7$ :

$$\alpha = 0,39 \cdot C \cdot \frac{\lambda \cdot \text{Pr}^{0,35}}{d^{0,40}} \cdot \left( \frac{s_1 - d}{s - d} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{v}{v'} \right)^{0,60}, \quad (1.18)$$

– при  $(s_1-d)/(s-d) < 0,7$ :

$$\alpha = 0,36 \cdot C \cdot \frac{\lambda \cdot \text{Pr}^{0,35}}{d^{0,40}} \cdot \left( \frac{v}{v'} \right)^{0,60}, \quad (1.19)$$

где  $s = \sqrt{0,25 \cdot s_1^2 + s_2^2}$  – диагональный шаг нагревателей, м;  $d$  – диаметр трубы, м;  $C$  – поправочный коэффициент, зависящий от числа рядов нагревателей  $z$  в продольном направлении (рис. 1.1, б).

Коэффициент  $\alpha$  при поперечном обтекании пучков труб с поперечным ребрами (оребрённые трубчатые электронагреватели (ТЭНы) в электрокалориферах) и при их «шахматной» компоновке определяется по формуле

$$\alpha = 0,213 \cdot \frac{\lambda_g}{b^{0,35}} \cdot \text{Pr}^{0,35} \cdot \left( \frac{d}{b} \right)^{-0,54} \cdot \left( \frac{h_p}{b} \right)^{-0,14} \cdot \left( \frac{v}{v'} \right)^{0,65}, \quad (1.20)$$

где  $b$  – шаг оребрения, м;  $h_p$  – высота оребрения, м.

Физические характеристики воздуха или газа в формулах (1.16-1.20) берут для средней температуры потока.

Теплопередача от открытых нагревателей осуществляется конвекцией и излучением. С повышением температуры интенсивность теплопередачи излучением растет быстрее, чем конвекцией, и становится особенно заметной при температурах поверхности свыше 500°C.

*Тепловое излучение* – процесс переноса теплоты от одного тела к другому посредством электромагнитных волн через разделяющую тела среду, прозрачную для волн. На поверхности излучающего тела происходит превращение внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн различной длины, которые затем распространяются в свободном пространстве со скоростью света.

Большинство твердых и жидких тел излучают энергию всех длин волн от 0 до  $\infty$  или, как говорят, имеют сплошной спектр. Чистые металлы и газы излучают энергию только в определенных интервалах длин волн или, как говорят, имеют прерывистый спектр, а их излучение является прерывистым или селективным.

Излучение всех тел в значительной степени зависит от абсолютной температуры их поверхности: с ростом температуры увеличивается интенсивность в целом и при этом повышается интенсивность коротковолнового при одновременном снижении длинноволнового излучения, что и определяет «цвет» излучения.

Наибольшей излучательной способностью обладает так называемое абсолютно черное тело, поток излучения  $\Phi$ , Вт, которого определяется законом Стефана-Больцмана:

$$\Phi = \sigma_0 \cdot F \cdot T^4 = C_0 \cdot F \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = 5,67 \cdot F \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (1.21)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma_0=5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T$  – абсолютное значение температуры поверхности тела, К;  $F$  – площадь поверхности излучения, м<sup>2</sup>.

Для реальных тел, часто называемых серыми, излучательная способность меньше излучательной способности абсолютно черных тел. Поток излучения серого тела  $\Phi$ , Вт:

$$\Phi = C \cdot F \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = 5,67 \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (1.22)$$

где  $C = \varepsilon \cdot C_0$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  – степень черноты серого тела ( $\varepsilon \leq 1$ ), представляющая собой отношение излучательной способности реального (серого) тела к излучательной способности абсолютно черного тела при той же самой температуре;  $T$  – абсолютное значение температуры поверхности серого тела, К;  $F$  – площадь поверхности излучения серого тела, м<sup>2</sup>.

Энергия излучения, попадая на какое-либо тело, частично им поглощается, а часть ее проходит сквозь тело. Тело, поглощающее все падающие на него лучи, воспринимается зрением как черное тело, поэтому оно и называется абсолютно черным телом. Серые тела не поглощают всей падающей на них лучистой энергии, при этом непоглощенную энергию эти тела отражают или пропускают сквозь себя. Тела, пропускающие всю падающую на них энергию, называются прозрачными или диатермическими.

В результате излучения энергии одним телом, более нагретым, и поглощения его другим телом, менее нагретым, происходит лучистый теплообмен.

Тепловой поток  $\Phi$ , Вт, передаваемый от излучателя, имеющего температуру  $T_1$ , К, к нагреваемому телу с температурой  $T_2$ , К, определяют по формуле, основанной на том же законе Стефана-Больцмана,

$$\Phi = 5,67 \cdot c_{np} \cdot F_{np} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1.23)$$

где  $c_{np}$  – приведенная степень черноты для системы из двух тел;  $T_1, T_2$  – абсолютное значение температуры излучателя и нагреваемого тела, К;  $F_{np}$  – взаимная поверхность излучения (приведенная площадь поверхности) тел (излучателя и нагреваемого тела), участвующих в теплообмене, м<sup>2</sup>.

Взаимная поверхность излучения (приведенная площадь поверхности) тел (излучателя и нагреваемого тела), участвующих в теплообмене определяется по следующей формуле, м<sup>2</sup>:

$$F_{np} = \varphi_{12} \cdot F_1 = \varphi_{21} \cdot F_2, \quad (1.24)$$

где  $F_1, F_2$  – площадь поверхностей участвующих в теплообмене тел, м<sup>2</sup>;  $\varphi_{12}, \varphi_{21}$  – средние по поверхности коэффициенты облученности тел, показывающие, какая часть полусферического теплового потока, испускаемого излучателем, падает на облучаемое тело.

Если принять во внимание, что  $P_1$  – мощность (тепловой поток) излучения, а  $P_2$  – мощность (тепловой поток), падающая на нагреваемое тело, то средние по поверхности коэффициенты облученности тел можно определить:

$$\varphi_{12} = \frac{P_2}{P_1}. \quad (1.25)$$

Коэффициенты облученности представляют собой чисто геометрические параметры, зависящие только от формы и взаимного расположения участвующих в теплообмене тел. Для простейшего случая теплообмена излучением между двумя параллельными плоскостями, имеющими размеры ( $F_1=F_2$ ), значительно превосходящие расстояние между ними,  $\varphi_{12}=\varphi_{21}$ . Приведенная степень черноты для системы из двух тел,  $c_{np}$ :

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 1}, \quad (1.26)$$

где  $\varepsilon_1$ ;  $\varepsilon_2$  – степень черноты поверхности материала излучателя и нагреваемого тела.

Если тела, между которыми происходит лучистый теплообмен, расположены одно ( $F_1, \varepsilon_1$ ) внутри другого ( $F_2, \varepsilon_2$ ), то формула (1.26) примет вид:

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (1.27)$$

Удельная поверхностная мощность  $\Delta P_{уд}$ , Вт/м<sup>2</sup>, для этого идеализированного случая, может быть определена по формуле

$$\Delta P_{уд} = 5,67 \cdot c_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right). \quad (1.28)$$

В большинстве реально эксплуатируемых установок из-за сложности конфигурации поверхностей тел и непрерывного обмена энергией между ними нельзя воспользоваться достаточно простой зависимостью (1.27). Поэтому в практических расчетах реальные установки и устройства заменяют идеализированной схемой и действительную мощность находят через  $\Delta P_{уд}$  по следующему выражению:

$$P = \Delta P_{уд} \cdot \alpha, \quad (1.29)$$

где  $\alpha$  – коэффициент эффективности излучения нагревателей, принимаемый, например, для проволочных спиралей на изолирующих трубках 0,3...0,35, трубчатых нагревателей – 0,60...0,70, ленточных зигзагообразных излучателей – 0,38...0,45.

*Массообмен* возникает при наличии разности концентраций рассматриваемого вещества. Способы переноса массы различны. Если масса переносится только за счет движения атомов и молекул, то такой процесс называется диффузией. При перемещении макроскопических объемов происходит конвективная массоотдача (при сублимации, сушке, химических реакциях и т.п.).

Процессы массопереноса аналогичны соответствующим процессам теплопереноса: диффузия – теплопроводности, конвективный массоперенос – конвективному теплопереносу, и описываются одинаковыми по форме записи математическими уравнениями.

## **1.2. Общие положения теплового расчета электронагревательных установок**

Получение теплоты из электрической энергии возможно по двум принципиально разным схемам:

1) по схеме прямого преобразования, когда электрическая энергия (энергия различных форм движения заряженных частиц в электрическом поле) преобразуется в тепловую (энергию тепловых колебаний атомов и молекул веществ);

2) по схеме косвенного преобразования, когда электрическая энергия преобразуется в тепловую в специальных преобразователях – электрических нагревателях, а затем уже от них путем теплопроводности, конвекции, излучения или комбинацией этих способов передается нагреваемой среде или материалу, причем температура источника может быть ниже температуры потребителя.

В зависимости от класса нагреваемых материалов (проводники, полупроводники, диэлектрики) и способов возбуждения в них электрического тока или поля различают следующие способы электрического нагрева: сопротивлением (резистивный), электродуговой, индукционный, диэлектрический, электронный, световой (лазерный).



Для электрического нагрева различных сред и материалов используют электротермическое оборудование, включающее в себя различные электрические нагреватели и электронагревательные установки.

*Электрический нагреватель (электронагреватель)* – это тепловыделяющий источник, преобразующий электрическую энергию в тепловую.

*Электронагревательная установка (ЭНУ)* – это агрегат или оборудование, включающие электрические нагреватели, рабочую камеру и другие элементы, связанные в едином конструктивном комплексе и предназначенные для совершения единого технологического процесса.

К основным параметрам электронагревательных установок относятся тепловая мощность, напряжение питания, частота тока, КПД, коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), основные геометрические размеры.

Тепловой расчёт проводят с целью определения технологических данных установок – мощности, температуры поверхности нагревательных элементов, интенсивности теплоотдачи, параметров тепловой изоляции, теплового КПД, обеспечивающих технологические требования, которые определяют по единой для всех электротермических установок методике.

При расчёте теплового режима электронагревательной установки удобно пользоваться аналогией тепловой цепи с электрической (табл. 1.1).

Тепловой расчёт электронагревательных установок основывается на совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи с учётом динамики нагрева.

Все процессы нагрева и охлаждения нестационарны, так как связаны с изменением теплосодержания материала и его температуры. Тепловое равновесие наступает, если поступающая тепловая энергия равна её расходу.

В общем случае тепловая энергия в электронагревательной установке полезно расходуется на нагрев или фазовое преобразование материала (например, испарение, плавление), а также нагрев вспомогательных устройств (например, упаковка, тара), которые по технологическим требованиям должны иметь температуру, равную температуре нагреваемого материала или среды.

Таблица 1.1

**Аналогия параметров тепловой и электрической цепей**

Тепловая цепь	Электрическая цепь
1. Разность температур $\Delta t$ , °C	1. Напряжение $U$ , В
2. Тепловой поток $\Phi$ , проходящий через участок тепловой цепи (например, через стенку), Вт: $\Phi = \frac{\Delta t}{R_m}$ где $\Delta t$ – температурный перепад, °C; $R_m$ – термическое сопротивление, °C/Вт	2. Электрический ток $I$ , А: $I = \frac{U}{R}$ где $U$ – напряжение, разность потенциалов, В; $R$ – электрическое сопротивление, Ом
3. Тепловое (термическое) сопротивление $R_m$ , °C/Вт: $R_m = \frac{\Delta_{cm}}{\lambda \cdot F}$ где $\Delta_{cm}$ – толщина теплоизоляции (например, стенки), м; $\lambda$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); $F$ – площадь стенки, м <sup>2</sup>	3. Электрическое сопротивление $R$ , Ом: $R = \frac{l}{\sigma \cdot S}$ где $l$ – длина проводника, м; $\sigma$ – удельная проводимость материала проводника, 1/(Ом·м); $S$ – сечение проводника, м <sup>2</sup>
4. Тепловое сопротивление многослойной стенки $R_{m\Sigma}$ , °C/Вт, каждый слой которой имеет разную толщину $\Delta_{cmi}$ и изготовлен из материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda_i$ : $R_{m\Sigma} = R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mn}$	4. Общее сопротивление при последовательном соединении сопротивлений $R_\Sigma$ , Ом: $R_\Sigma = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

Тепловая энергия безвозвратно расходуется или теряется, что характерно для всех электротермических установок.

Тепловая энергия в электротермическую установку поступает от электрических нагревателей, от различного технологического и электротехнического оборудования (электродвигатели, лампы накаливания и т.п.), а также от биологических объектов животного и растительного происхождения.

С учетом указанных обстоятельств, уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$\Sigma Q_{noc} = \Sigma Q_{pac}, \quad (1.30)$$

где  $\Sigma Q_{noc}$  – суммарные поступления тепловой энергии, Дж;  $\Sigma Q_{pac}$  – суммарный расход тепловой энергии, Дж,

или

$$Q_{эн} + Q_{об} + Q_{эо} = Q_{пол} + Q_{всн} + Q_{ном}, \quad (1.31)$$

где  $Q_{эн}$ ,  $Q_{б}$ ,  $Q_{эо}$  – тепловая энергия электронагревателей, биологических объектов и работающего технологического оборудования и электрооборудования, Дж;  $Q_{пол}$  – тепловая энергия, расходуемая полезно, Дж;  $Q_{всп}$  – тепловая энергия, затрачиваемая на нагрев вспомогательных устройств, Дж;  $Q_{ном}$  – энергия тепловых потерь, Дж.

Установленную (присоединенную) мощность электронагревательной установки  $P_{уст}$ , Вт, можно определить по формуле

$$P_{уст} = \frac{k_3 \cdot P_{номп}}{\eta_э \cdot \eta_m}, \quad (1.32)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса;  $P_{номп}$  – потребляемая мощность, Вт;  $\eta_э$  – электрический КПД установки;  $\eta_m$  – тепловой (термический) КПД установки.

Коэффициент запаса ( $k_3=1,1-1,3$ ) учитывает уменьшение фактической мощности вследствие снижения питающего напряжения, старения материалов нагревателей, а также возможное отклонение условий эксплуатации от расчётных значений.

Потребная мощность электронагревательной установки  $P_{номп}$ , Вт:

$$P_{номп} = P_{пол} + P_{всп} + P_{ном}, \quad (1.33)$$

где  $P_{пол}$  – полезная тепловая мощность, Вт;  $P_{всп}$  – мощность, идущая на нагрев вспомогательных устройств, Вт;  $P_{ном}$  – мощность тепловых потерь, Вт.

Для электронагревательной установки периодического действия полезная теплота  $Q_{пол}$ , Дж:

$$Q_{пол} = V \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (1.34)$$

где  $V$  – объём материала, м<sup>3</sup>;  $\delta$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·°C);  $t_2$  – конечная температура нагрева, °C;  $t_1$  – начальная температура материала, °C.

Все тепловые процессы связаны либо с нагревом твёрдых, 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, например плавление, парообразование и т.п. Наиболее полное представление о последовательности протекающих процессов можно сделать рассмотрев процесс преобразования твердого тела – льда с температурой

$t_1$ , °С, в газообразное – пар с температурой  $t_2$ , °С. В этом случае полезное количество теплоты  $Q_{пол}$ , Дж, определится выражением:

$$Q_{пол} = m \cdot c_1 \cdot (t_{пл} - t_1) + m \cdot a_{пл} + m \cdot c_2 \cdot (t_n - t_{пл}) + m \cdot a_n + m \cdot c_3 \cdot (t_2 - t_n), \quad (1.35)$$

где  $m$  – масса нагреваемого материала, кг;  $c_1, c_2, c_3$  – удельные массовые теплоемкости соответственно льда, воды и пара, Дж/(кг·°С);  $a_{пл}, a_n$  – удельная теплота плавления и парообразования соответственно, Дж/кг;  $t_{пл}, t_n$  – температура плавления и парообразования льда и воды соответственно, °С.

В реальных процессах фазовые превращения могут отсутствовать.

В эксплуатируемых установках чаще всего производится только нагрев материалов и в частных случаях для конкретных установок учитывается процесс плавления, испарения и т.п.

Полезная мощность  $P_{пол}$ , Вт:

$$P_{пол} = \frac{Q_{пол}}{\tau} = \frac{V \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (1.36)$$

где  $\tau$  – время нагрева, с.

Для электронагревательной установки непрерывного действия полезная теплота  $Q_{пол}$ , Дж:

$$Q_{пол} = L \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (1.37)$$

где  $L$  – объёмная подача нагреваемого материала в ЭТУ, м<sup>3</sup>/с.

Полезная мощность  $P_{пол}$ , Вт:

$$P_{пол} = Q_{пол}. \quad (1.38)$$

Мощность, затрачиваемую на нагрев вспомогательных устройств, находят по формулам расчёта полезной мощности, причём температуру вспомогательного оборудования принимают равной температуре нагреваемого материала.

Тепловые потери электронагревательных установок связаны с тремя способами передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением, причём в установках передача тепла может осуществляться одновременно двумя или всеми тремя перечисленными способами (для расчета могут использоваться формулы 1.1-1.23).

Общий КПД  $\eta_{общ}$ , о.е., электронагревательных установок:

$$\eta_{общ} = \eta_\varepsilon \cdot \eta_m. \quad (1.39)$$

Электрический КПД  $\eta_{э}$ , о.е., зависит главным образом от способа электронагрева.

Таблица 1.2

### Усредненные значения электрического КПД

Способ электрического нагрева	Электрический КПД $\eta_{э}$ , о.е.
Методом сопротивления	$\approx 1,0$
Электродуговой	$\approx 1,0$
Индукционный	0,5-0,7
Диэлектрический ВЧ	0,4-0,5
Диэлектрический СВЧ	0,7
Электронный и лазерный	до 0,005

Термический КПД  $\eta_m$ , о.е., показывает, какая часть тепловой энергии, выделенной в нагревателе ЭТУ, идёт на повышение теплосодержания материала или среды.

Для практических расчётов термический КПД можно определить по формулам:

$$\eta_m = \frac{Q_{пол}}{Q_{пол} + Q_{всп} + Q_{пот}} \quad (1.40)$$

или

$$\eta_m = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + P_{всп} + P_{пот}}. \quad (1.41)$$

Для основных электронагревательных установок сельскохозяйственного назначения могут быть приняты следующие значения термического КПД.

Таблица 1.3

### Значения термического КПД

Электронагревательные установки	Термический КПД $\eta_m$ , о.е.
Электродные водонагреватели и парогенераторы	$\approx 0,8-0,97$
Проточные элементные водонагреватели	$\approx 0,95-0,98$
Электрические нагреватели-термосы	$\approx 0,85-0,95$
Электрокалориферы	$\approx 0,95-1,0$
Электрические печи сопротивления	$\approx 0,7-0,9$
Электросварочные установки	$\approx 0,5-0,95$
Высокочастотные установки	$\approx 0,6-0,9$
Бытовые электроприборы	$\approx 0,6-0,8$

Оптимальные геометрические размеры электротермической установки определяют из условия минимальной поверхности

теплоотдачи при заданном объеме. Для установки цилиндрической формы это условие выполняется, если диаметр цилиндрической поверхности электротермической установки  $D_{эту}$  равен ее высоте  $H_{эту}$ .

Тепловая изоляция предназначена для снижения потерь теплового потока в окружающую среду. Уменьшить потери теплоты и, следовательно, увеличить КПД электротермических установок можно, увеличив толщину изоляции или применив изоляцию с меньшей теплопроводностью.

Требования, предъявляемые к тепловой изоляции, многогранны и противоречивы: она должна быть как можно дешевле, тоньше, легче, обладать достаточной механической прочностью, малыми теплопроводностью и электрической проводимостью, выдерживать высокие температуры.

Используемые в настоящее время теплоизоляционные материалы не удовлетворяют всем этим требованиям в полной мере. Поэтому тепловую изоляцию делают многослойной. Слой, прилегающий к нагревателю, выполняют из термостойкого материала. Его назначение – снизить температуру до уровня, который может выдерживать следующий слой, имеющий меньшую теплопроводность  $\lambda$ .

При выборе изоляционного материала следует учитывать такие важные факторы, как температурные характеристики, теплопроводность изоляции  $\lambda$ , механические свойства, химическую совместимость, коррозионную стойкость, влагостойкость, безопасность для персонала, огнестойкость, токсичность при горении, стоимость.

Выбор материала каждого слоя и его толщины – есть технико-экономическая задача по определению минимума приведенных затрат.

Оптимальная толщина тепловой изоляции из условия минимума удельных приведенных затрат (если пренебречь малым термическим сопротивлением металлической стенки), м:

$$\Delta_{II} = \sqrt{\frac{\tau_{эту} \cdot (t_{вн} - t_n) \cdot C_{э} \cdot \lambda_{II}}{10 \cdot C_{II} \cdot (C_a + E_n)}} - \left( \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_{II}, \quad (1.42)$$

где  $t_{вн}$  и  $t_n$  – температура теплоносителя и воздуха в помещении где установлена электротермическая установка, °С;  $\alpha_{вн}$  и  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи теплоносителя внутренней поверхности кожуха электротерми-

ческой установки и коэффициент теплоотдачи наружной поверхности кожуха электротермической установки окружающему воздуху, Вт/(м·°С);  $C_3$  – стоимость 1 кВт·ч электрической энергии, руб./(кВт·ч);  $\tau_{\text{эксп}}$  – продолжительность работы установки в течении года, с;  $C_a$  – годовые отчисления на амортизацию, %;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, %;  $C_{II}$  – стоимость 1 м<sup>3</sup> тепловой изоляции, руб./м<sup>3</sup>;  $\lambda_{II}$  – теплопроводность материала тепловой изоляции, Вт/(м·°С).

### Примеры решения задач

**Задача 1.1.** В медном калориметре массой  $m_1 = 100$  г находится  $m_2 = 1$  кг воды при температуре  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . В воду опускают свинцовую деталь массой  $m_3 = 2$  кг, имеющую температуру  $t_1 = 90^\circ\text{C}$ . Удельная массовая теплоемкость меди равна  $c_1 = 380$  Дж/(кг·°С); воды –  $c_2 = 4200$  Дж/(кг·°С); свинца –  $c_3 = 140$  Дж/(кг·°С). До какой температуры нагреется вода? Потерями теплоты в калориметре пренебречь.

#### Решение

Вода и калориметр находились в тепловом равновесии, поэтому они имели одинаковую температуру  $t_1 = t_2 = 20^\circ\text{C}$ .

При опускании в воду с температурой  $20^\circ\text{C}$  свинцового тела с температурой  $t_3 = 90^\circ\text{C}$  между водой и свинцом будет происходить теплообмен, поэтому свинец будет остывать, а вода – нагреваться. В этом же процессе участвует и калориметр, который, как и вода, будет тоже нагреваться.

Для нахождения решения воспользуемся уравнением теплового баланса, которое запишем в виде

$$Q_1 + Q_2 = Q_3$$

или

$$c_1 \cdot m_1 \cdot (t' - t_1) + c_2 \cdot m_2 \cdot (t' - t_2) = c_3 \cdot m_3 \cdot (t_3 - t')$$

Вода нагреется до температуры:

$$t' = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot t_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot t_2 + c_3 \cdot m_3 \cdot t_3}{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2 + c_3 \cdot m_3} = \frac{380 \cdot 0,1 \cdot 20 + 4200 \cdot 1 \cdot 20 + 140 \cdot 2 \cdot 90}{380 \cdot 0,1 + 4200 \cdot 1 + 140 \cdot 2} =$$

$$= 24^\circ\text{C}.$$

**Задача 1.2.** Железный стержень массой  $m = 5$  кг, нагретый до температуры  $t_1 = 550^\circ\text{C}$ , опускается в воду. Удельная теплоемкость железа  $c_1 = 460$  Дж/(кг·°C). Сколько теплоты каждую секунду теряет стержень, если за  $\tau = 10$  мин он остывает до  $t_2 = 45^\circ\text{C}$ ?

### Решение

Необходимо определить, сколько теплоты каждую секунду теряет стержень, что по сути является тепловой мощностью  $P$ , которая находится отношением количества теплоты  $Q$  ко времени  $\tau$ :

$$P = \frac{Q}{\tau}.$$

Количество теплоты  $Q$ , теряемое железным стержнем при остывании, можно определить по формуле

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2).$$

Сопоставим две вышеприведенные формулы и получим решение задачи в общем виде:

$$P = \frac{c \cdot m \cdot (t_1 - t_2)}{\tau}.$$

Ежесекундные потери теплоты равны:

$$P = \frac{460 \cdot 5 \cdot (550 - 45)}{600} = 1936 \text{ Вт} \approx 1,94 \text{ кВт}.$$

**Задача 1.3.** В электрическом чайнике мощностью  $P = 800$  Вт можно вскипятить  $V = 1,6$  л воды, имеющей температуру  $t = 20^\circ\text{C}$ , за  $\tau = 20$  мин. Удельная теплоемкость воды равна  $c = 4200$  Дж/(кг·°C), плотность воды равна  $\delta = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Найти КПД ( $\eta$ ) нагрева воды при помощи электрического чайника.

### Решение

Коэффициент полезного действия  $\eta$  равен отношению полезно расходуемой теплоты  $Q_{\text{пол}}$  к затраченной –  $Q_3$ :

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_3}.$$

Полезно расходуемая теплота  $Q_n$  определяется тем, что чайник нагревает воду до кипения (температура кипения  $t_k = 100^\circ\text{C}$ ).

$$Q_{\text{пол}} = c \cdot m \cdot (t_k - t) = c \cdot \delta \cdot V \cdot (t_k - t).$$

Затраченную теплоту  $Q_3$  определим как произведение мощности чайника  $P$  на время  $\tau$ :



$$Q_3 = P \cdot \tau.$$

Тогда коэффициент полезного действия  $\eta$  равен:

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_3} = \frac{c \cdot \delta \cdot V \cdot (t_{\kappa} - t)}{P \cdot \tau} = \frac{4200 \cdot 1000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)}{800 \cdot 1200} = 0,56.$$

**Задача 1.4.** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской теплоизоляционной конструкции, состоящей из трех слоев: а) прокладочного, толщиной  $\Delta_{cm1} = 10 \text{ мм} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и теплопроводностью  $\lambda_1 = 0,28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ; б) основного, выполненного из диатомитового кирпича –  $\Delta_{cm2} = 60 \text{ мм} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\lambda_2 = 0,14 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , и слоя штукатурки –  $\Delta_{cm3} = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\lambda_3 = 1,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

### Решение

Тепловой поток, передаваемый через тело (стенку), в соответствии с законом Фурье, определяется по формуле

$$\Phi = \lambda \cdot \frac{\Delta t \cdot F}{\Delta_{cm}} = \frac{\Delta t \cdot F}{R_m}.$$

Полное термическое сопротивление многослойной стенки равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots = \frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2} + \frac{\Delta_{cm3}}{\lambda_3} + \dots$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской теплоизоляционной конструкции определим как

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\Delta_{cm13}}{\frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2} + \frac{\Delta_{cm3}}{\lambda_3}} = \frac{\Delta_{cm1} + \Delta_{cm2} + \Delta_{cm3}}{\frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2} + \frac{\Delta_{cm3}}{\lambda_3}} = \\ &= \frac{(10 + 60 + 5) \cdot 10^{-3}}{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,28} + \frac{60 \cdot 10^{-3}}{0,14} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,16}} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}). \end{aligned}$$

**Задача 1.5.** Определить наружную температуру кирпичной кладки трубчатой печи  $t_{cmn}$ , если ее поверхность составляет  $F = 140 \text{ м}^2$ . Тепловой поток  $\Phi = 120 \text{ кВт}$ , а температура огнеупорной кладки со стороны топки  $t_{cmвн} = 1020^\circ\text{C}$ . Кирпичная кладка состоит из двух слоев: огнеупорного толщиной  $\Delta_{cm1} = 250 \text{ мм} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и теплопроводностью  $\lambda_1 = 0,34 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , а также

красного кирпича толщиной  $\Delta_{cm2} = 250 \text{ мм} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и теплопроводностью  $\lambda_2 = 0,68 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .

### Решение

Тепловой поток, передаваемый через двухслойную стенку, в соответствии с законом Фурье, определяется по формуле

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R_m} = \frac{t_{cmвн} - t_{cmн}}{\frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2 \cdot F_2}}$$

Отсюда наружная температура кирпичной кладки может быть найдена по формуле:

$$\begin{aligned} t_{cmн} &= t_{cmвн} - \Phi \cdot R_m = t_{cmвн} - \Phi \cdot \left( \frac{\Delta_{cm1}}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{\Delta_{cm2}}{\lambda_2 \cdot F_2} \right) = \\ &= 1020 - 120000 \cdot \left( \frac{250 \cdot 10^{-3}}{0,34 \cdot 140} + \frac{250 \cdot 10^{-3}}{0,68 \cdot 140} \right) = 74,4 \text{ } ^\circ\text{С}. \end{aligned}$$

**Задача 1.6.** Определить лучистый теплообмен между двумя параллельными поверхностями, если их температуры соответственно равны:  $t_1 = 1200^\circ\text{С}$  и  $t_2 = 200^\circ\text{С}$ ; площадь поверхности  $F = 4,0 \text{ м}^2$ . Степень черноты материала первой поверхности  $\varepsilon_1 = 0,8$ , а второй –  $\varepsilon_2 = 0,5$ . Коэффициент излучения абсолютно черного тела  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

### Решение

Определяем приведенную степень черноты двух поверхностей:

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,5} - 1} = 0,444.$$

Определяем значение теплового потока для лучистого теплообмена:

$$\begin{aligned} \Phi &= c_{np} \cdot C_0 \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,444 \cdot 5,67 \cdot 4,0 \cdot \left[ \left( \frac{1473}{100} \right)^4 - \left( \frac{473}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 0,444 \cdot 5,67 \cdot 4,0 \cdot [14,73^4 - 4,73^4] = 469000 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

**Задача 1.7.** Трубчатый электронагреватель (ТЭН) диаметром  $D_n = 13$  мм, с температурой поверхности  $T_1 = 550$  К, расположен коаксиально в трубе с внутренним диаметром  $d_{en} = 30$  мм и температурой поверхности 320 К. Степень черноты поверхности ТЭНа  $\varepsilon_1 = 0,9$ , а внутренней поверхности трубы – 0,3. Средний коэффициент облученности тел (ТЭНа и трубы)  $\varphi_{12} = 0,95$ . Определить мощность теплового потока на 1 м длины, передаваемого от ТЭНа трубе.

### Решение

Площадь поверхности 1 м ТЭНа:

$$F_1 = \pi \cdot D_n \cdot l = 3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 = 0,04 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности 1 м внутренней поверхности трубы:

$$F_2 = \pi \cdot d_{en} \cdot l = 3,14 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 = 0,09 \text{ м}^2.$$

Приведенная степень черноты участвующих в теплообмене тел, одно из которых (ТЭН) расположено внутри другого (труба):

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{0,04}{0,09} \cdot \left( \frac{1}{0,5} - 1 \right)} = 0,46.$$

Взаимная поверхность излучения:

$$F_{np} = \varphi_{12} \cdot F_1 = 0,95 \cdot 0,04 = 0,038 \text{ м}^2.$$

Мощность теплового потока:

$$P = 5,67 \cdot \varepsilon_{np} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{np} = \\ = 5,67 \cdot 0,46 \cdot \left[ \left( \frac{550}{100} \right)^4 - \left( \frac{320}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,038 = 80,3 \text{ Вт}.$$

**Задача 1.8.** Определить коэффициент теплопередачи от газобразных нагретых продуктов к горячей воде в конвективной части теплообменника (котла), если коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов  $\alpha_{1к} = 28,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), коэффициент теплоотдачи излучением от газов к стенке  $\alpha_{1н} = 7,3$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Толщина стенок труб  $\Delta_{cm} = 4$  мм =  $4 \cdot 10^{-3}$  м, а теплопроводность стенок  $\lambda_{cm} = 40,7$  Вт/(м·°С). Стенки покрыты внутри налетом (сажей) толщиной  $\Delta_c = 0,1$  мм =  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м с теплопроводностью  $\lambda_c = 0,06$  Вт/(м·°С), а снаружи накипью –  $\Delta_n = 1$  мм =  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м с

теплопроводностью  $\lambda_n = 2,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ . Коэффициент теплоотдачи от стенки к горячей воде  $\alpha_{2к} = 2300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$ .

### Решение

Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны газообразных продуктов сгорания:

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \alpha_{1,г} = 28,0 + 7,3 = 35,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С}).$$

Определяем полное термическое сопротивление теплопередаче:

$$R_m = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_{cm}}{\lambda_{ct}} + \frac{\Delta_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{35,3} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{40,7} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,06} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2,3} + \frac{1}{2300} =$$

$$= 30,94 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{С)}/\text{Вт}.$$

Определяем коэффициент теплопередачи:

$$\kappa = \frac{1}{R_m} = \frac{1}{30,94 \cdot 10^{-3}} = 32,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С}).$$

**Задача 1.9.** Рассчитать тепловые потери закалочной печи для нагрева стальных стержней диаметром  $D = 80 \text{ мм}$  и длиной  $l = 350 \text{ мм}$ . В печь одновременно укладывается  $n = 6$  деталей, изготовленных из стали (плотность стали –  $\delta = 7,8 \text{ кг}/\text{дм}^3$ ; теплоемкость стали –  $c = 0,482 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{С})$ ). Между деталями и тепловой изоляцией рекомендуется зазор размером  $\Delta = 110\text{-}140 \text{ мм}$ . Продолжительность нагрева  $\tau = 2 \text{ ч}$ . Температура закалки  $t_3 = 870^\circ\text{С}$ , наружная –  $t_n = 20^\circ\text{С}$ . Тепловая изоляция состоит из двух слоев: первый слой толщиной  $\Delta_{ш} = 65 \text{ мм}$  – из шамотовых кирпичей; второй слой – вермикулитовая засыпка толщиной  $\Delta_v = 250 \text{ мм}$ . Определить мощность  $P$ , необходимую для нагрева, КПД нагрева. Определить какую температуру должна иметь наружная поверхность стенки печи  $t_{cm}$ , а также температуру между слоями изоляции  $t_{cl}$ .

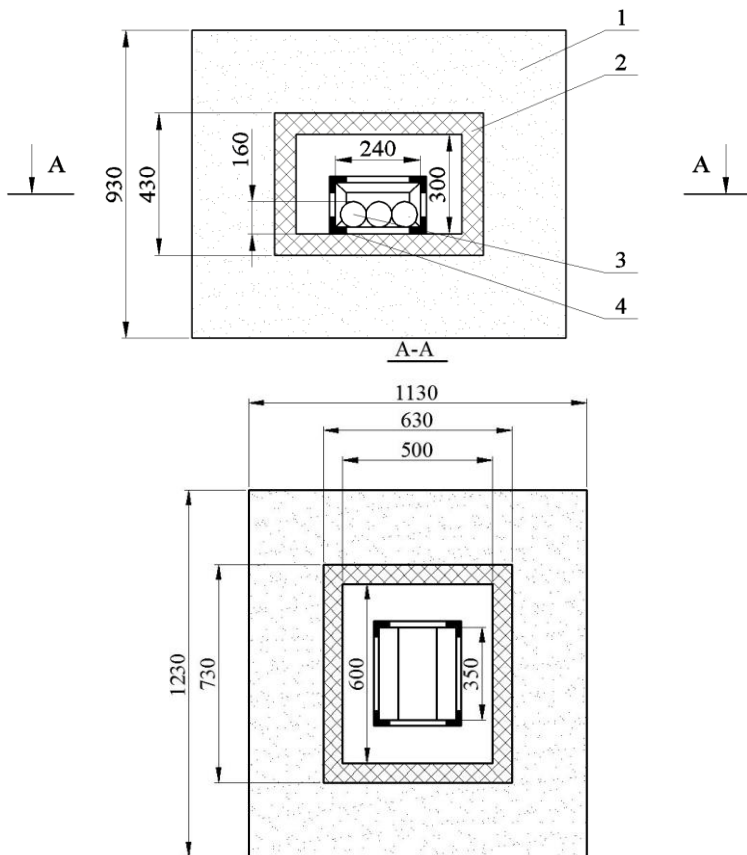
### Решение

Масса нагреваемых стержней:

$$m = n \cdot \delta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l = 6 \cdot 7,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \cdot 3,5 = 82 \text{ кг}.$$

Тепловая энергия, необходимая для нагрева деталей:

$$Q_{пол} = c \cdot m \cdot (t_3 - t_n) = 0,482 \cdot 82 \cdot (870 - 20) = 33500 \text{ кДж}.$$



**Рис. 1.2. Эскиз футеровки закалочной печи:**

1 – слой теплоизоляции; 2 – слой огнеупорной изоляции; 3 – нагреваемые детали;  
4 – контейнер из жаропрочной стали

Полезная мощность, идущая на нагрев:

$$P_{пол} = \frac{Q_{пол}}{\tau} = \frac{33500}{3600 \cdot 2} = 4,65 \text{ кВт.}$$

Площадь внутренней поверхности печи:

$$F_{вн} = 2 \cdot (0,3 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 0,5) = 1,26 \text{ м}^2.$$

Площадь наружной поверхности шамотовой кладки:

$$F_{ши} = 2 \cdot (0,73 \cdot 0,43 + 0,73 \cdot 0,63 + 0,43 \cdot 0,63) = 2,09 \text{ м}^2.$$

Площадь наружной поверхности печи:

$$F_n = 2 \cdot (0,93 \cdot 1,23 + 0,93 \cdot 1,13 + 1,23 \cdot 1,13) = 7,08 \text{ м}^2.$$

Средняя площадь поверхности шамотовой кладки, при неравенстве площадей внутренней и наружной поверхностей, может быть найдена по выражению:

$$F_{ш} = \sqrt{F_{вн} \cdot F_{ни}} = \sqrt{1,26 \cdot 2,09} = 1,62 \text{ м}^2.$$

Средняя площадь поверхности вермикулитовой засыпки:

$$F_b = \sqrt{F_{ни} \cdot F_n} = \sqrt{2,09 \cdot 7,08} = 3,85 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери печи, при условии пренебрежения термическим сопротивлением от внутреннего объёма печи до стенки ( $1/(\alpha_{вн} \cdot F_{вн})=0$ ):

$$P_{пот} = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{\frac{1}{\alpha_n F_n} + \frac{\Delta_g}{\lambda_b F_b} + \frac{\Delta_{ш}}{\lambda_{ш} F_{ш}}} = \frac{870 - 20}{\frac{1}{12 \cdot 7,08} + \frac{0,25}{0,15 \cdot 3,85} + \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,62}} = 1780 \text{ Вт}.$$

Мощность, необходимая для нагрева деталей:

$$P = P_{пол} + P_{пот} = 4,65 + 1,78 = 6,4 \text{ кВт}.$$

Температура между слоями тепловой изоляции:

$$t_{сл} = t_{вн} - P_{пот} \cdot \frac{\Delta_{ш}}{\lambda_{ш} \cdot F_{ш}} = 870 - 1780 \cdot \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,62} = 813^\circ\text{C}.$$

Температура наружной поверхности стенки печи:

$$t_{ст} = \frac{P_{пот}}{\alpha_n \cdot F_n} + t_n = \frac{1780}{12 \cdot 7,08} + 20 = 41^\circ\text{C}.$$

КПД нагрева:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{пот}} = \frac{4,65}{4,65 + 1,78} = 0,723.$$

**Задача 1.10.** Стенка парового котла выполнена из стали толщиной  $\Delta_{ст} = 10 \text{ мм} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_c = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Температура дымовых газов  $t_g = 1127^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от них к стенке  $\alpha_1 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Температура кипящей воды  $t_{кв} = 220^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от стенки к воде  $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . В процессе эксплуатации стенка со стороны воды покрывается слоем накипи с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_n = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . При какой максимальной толщине

слоя накипи допустимо использовать котел, если предельно допустимая температура для стали  $t_{np} = 700^\circ\text{C}$ .

### Решение

Максимальной и в предельном случае равной допустимой температуре для стали  $t_{np}$  будет температура поверхности стального листа, обращенной к дымовым газам. Для теплоотдачи от газов к стенке справедлив закон Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot F \cdot (t_z - t_{np}).$$

С другой стороны, процесс теплопередачи в плоской многослойной стенке может быть описан уравнением:

$$\Phi = F \cdot \frac{t_z - t_{кв}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta_{max}}{\lambda_{ч}} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Два этих уравнения образуют систему с двумя неизвестными –  $\Delta_{max}$  и  $\Phi$ . Решая их совместно, получаем:

$$\Delta_{max} = \left[ \frac{t_z - t_{кв}}{\alpha_1 \cdot (t_z - t_{np})} - \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_{cm}}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right] \cdot \lambda_{ч} = 0,02 \text{ м.}$$

**Задача 1.11.** Определить расчетную мощность и тепловой КПД электротермической установки для нагрева 200 кг воды от 15 до  $90^\circ\text{C}$  за 2 ч. Вода нагревается в баке из малоуглеродистой стали с внешним диаметром  $d_n = 0,6$  м, высотой  $h = 0,8$  м, с толщиной стенок  $\Delta_{cm} = 0,002$  м. Коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda_{cm} = 50,5$  Вт/(м·°C). Теплоемкость воды  $c = 4,19$  кДж/(кг·°C), температура окружающей среды  $t_o = 20^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определяем полезную мощность:

$$P_{пол} = \frac{c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = \frac{4190 \cdot 200 \cdot (90 - 15)}{2 \cdot 3600} = 8729,16 \text{ Вт} = 8,73 \text{ кВт.}$$

Внутренним контактным термическим сопротивлением  $1/\alpha_1$  при переходе теплоты от воды к баку можно пренебречь ввиду его малости.

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности бака:

$$\alpha_2 = 3,26 \cdot \sqrt[4]{\Delta t} = 3,26 \cdot \sqrt[4]{(90 - 20)} = 9,42.$$

Внутренний диаметр бака:

$$d_{вн} = d_n - 2\Delta_{cm} = 30,6 - 2 \cdot 0,002 = 0,596 \text{ м.}$$

Термическое сопротивление боковой цилиндрической стенки бака на 1 м длины:

$$R_{m\text{бок}} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda_{cm}} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_n} \right) = \frac{1}{3,14} \left( \frac{1}{2 \cdot 50,5} \cdot \ln \frac{0,6}{0,596} + \frac{1}{9,42 \cdot 0,6} \right) = 0,056 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт.}$$

Термическое сопротивление боковой поверхности бака:

$$R_{m\text{бок}} = R_{m\text{бок}} \cdot h = 0,056 \cdot 0,8 = 0,045 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт.}$$

Термическое сопротивление торцевой поверхности бака по выражению:

$$R_{mm} = \frac{\Delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{0,002}{50,5} + \frac{1}{9,42} = 0,106 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт.}$$

Площадь боковой поверхности бака:

$$F_{\text{бок}} = \pi \cdot d_n \cdot h = 3,14 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 1,51 \text{ м}^2.$$

Площадь торцевой поверхности:

$$F_m = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 0,28 \text{ м}^2.$$

Тепловой поток, теряемый через боковую поверхность:

$$P_{\text{бок}} = \frac{\Delta t}{R_{m\text{бок}}} \cdot F_{\text{бок}} = \frac{90 - 20}{0,045} \cdot 1,51 = 2348 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, теряемый через торцевую поверхность:

$$P_m = \frac{\Delta t}{R_{mm}} \cdot F_m = \frac{90 - 20}{0,106} \cdot 0,28 = 1849 \text{ Вт.}$$

Общие потери:

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{бок}} + 2P_m = 2348 + 2 \cdot 1849 = 2717,8 \text{ Вт} = 2,72 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{пот}} = 8,73 + 2,72 = 11,45 \text{ кВт.}$$

Тепловой КПД:

$$\eta_m = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{расч}}} = \frac{8,73}{11,45} = 0,76.$$



Установленная мощность:

$$P_{уст} = \kappa_3 \cdot P_{расч} = 1,2 \cdot 11,45 = 13,74 \approx 14,0 \text{ кВт.}$$

**Задача 1.12.** Определить оптимальные геометрические размеры, наиболее выгодную толщину изоляции, КПД и мощность проточного водонагревателя вместимостью  $V_{эму} = 0,4 \text{ м}^3$ . Объемный расход воды через водонагреватель  $L = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , начальная температура воды  $t_1 = 5^\circ\text{C}$ , конечная –  $t_2 = 5^\circ\text{C}$ . Теплопроводность материала тепловой изоляции  $\lambda_{И} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , годовые амортизационные отчисления 12%. Стоимость теплоизоляции  $C_{И} = 50 \text{ руб.}/\text{м}^3$ , стоимость электрической энергии  $C_{Э} = 0,01 \text{ руб.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Время работы установки в течение года  $\tau = 1500 \text{ ч}$ . Коэффициент запаса  $k_3 = 1$ . Температура воздуха в помещении, в котором установлен водонагреватель  $t_{вн} = 15^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи наружного кожуха водонагревателя  $\alpha_{н} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Внутренним удельным контактным термическим сопротивлением ( $1/\alpha_{вн}$ ) при переходе теплоты от воды к внутренней поверхности бака водонагревателя можно пренебречь ввиду его малости. Толщина металлической стенки бака водонагревателя  $\Delta_{см} = 0,003 \text{ м}$ , а теплопроводность –  $\lambda_{см} = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

### Решение

Оптимальные геометрические размеры цилиндрического тела из условия минимума боковой поверхности при  $D_{эму} = H_{эму}$  определяем из выражений для объема:

$$V_{эму} = \frac{\pi \cdot D_{эму}^2}{4} \cdot H_{эму} = \frac{\pi \cdot D_{эму}^3}{4},$$

откуда

$$D_{эму} = H_{эму} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{эму}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,4}{3,14}} = 0,8 \text{ м.}$$

При расчете толщины тепловой изоляции учитываем следующее. Дно водонагревателя выполняется без тепловой изоляции – так как температура воды у дна  $t_1 = 5^\circ\text{C}$ , т.е. здесь теплота не теряется, а наоборот поступает из воздуха помещения в нагреватель. Тепловую изоляцию боковой поверхности водонагревателя будем рассчитывать по средней температуре воды, принимая:

$$t_{вн} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{5 + 85}{2} = 45^\circ\text{C},$$

так как за время прохождения воды от входа водонагревателя к выходу она нагреется от температуры 5°C до температуры 85°C. Толщина тепловой изоляции крышки водонагревателя должна быть максимальной, так как температура воды у крышки  $t_{вн} = t_2 = 85^\circ\text{C}$ .

Оптимальная толщина тепловой изоляции боковой поверхности водонагревателя:

$$\Delta_{Ибок} = \sqrt{\frac{\tau_{эму} \cdot (t_{вн} - t_n) \cdot C_э \cdot \lambda_{И}}{10 \cdot C_{И} \cdot (C_a + E_n)}} - \left( \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_{И} = \sqrt{\frac{\tau_{эму} \cdot (t_{вн} - t_n) \cdot C_э \cdot \lambda_{И}}{10 \cdot C_{И} \cdot (C_a + E_n)}} - \frac{1}{\alpha_n} \cdot \lambda_{И} =$$

$$= \sqrt{\frac{1500 \cdot (45 - 15) \cdot 0,01 \cdot 0,04}{10 \cdot 50 \cdot (12 + 15)}} - \frac{1}{10} \cdot 0,03 = 0,0335 \text{ м.}$$

Принимаем  $\Delta_{Ибок} = 0,03 \text{ м.}$

Оптимальная толщина тепловой изоляции крышки водонагревателя:

$$\Delta_{Иок} = \sqrt{\frac{\tau_{эму} \cdot (t_{вн} - t_n) \cdot C_э \cdot \lambda_{И}}{10 \cdot C_{И} \cdot (C_a + E_n)}} - \frac{1}{\alpha_n} \cdot \lambda_{И} = \sqrt{\frac{1500 \cdot (85 - 15) \cdot 0,01 \cdot 0,04}{10 \cdot 50 \cdot (12 + 15)}} - \frac{1}{10} \cdot 0,03 =$$

$$= 0,0528 \text{ м.}$$

Принимаем  $\Delta_{Иок} = 0,05 \text{ м.}$

Расчетные площади дна и крышки водонагревателя:

$$F_д = F_к = \frac{\pi \cdot D_{эму}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} = 0,5 \text{ м}^2.$$

Тепловой поток, поступающий из воздуха помещения в водонагреватель через дно:

$$\Phi_д = \frac{(t_n - t_1)}{\frac{\Delta_{cm}}{\lambda_{cm} \cdot F_д} + \frac{1}{\alpha_n \cdot F_д}} = \frac{(15 - 5)}{\frac{0,003}{40 \cdot 0,5} + \frac{1}{10 \cdot 0,5}} = 50 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, теряемый водонагревателем через боковую цилиндрическую поверхность:

$$\Phi_{бок} = \frac{\pi \cdot H_{эму} \cdot (t_{вн} - t_n)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{И}} \cdot \ell n \frac{D_{эму} + 2 \cdot \Delta_{Ибок}}{D_{эму}} + \frac{1}{\alpha_n \cdot (D_{эму} + 2 \cdot \Delta_{Ибок})}} =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 0,8 \cdot (45 - 15)}{\frac{1}{2 \cdot 0,04} \cdot \ell n \frac{0,8 + 2 \cdot 0,03}{0,8} + \frac{1}{10 \cdot (0,8 + 2 \cdot 0,03)}} = 74 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, теряемый водонагревателем через крышку водонагревателя:

$$\Phi_k = \frac{(t_2 - t_n)}{\frac{\Delta_{Ик}}{\lambda_{И} \cdot F_k} + \frac{1}{\alpha_n \cdot F_k}} = \frac{(85 - 15)}{\frac{0,05}{0,04 \cdot 0,5} + \frac{1}{10 \cdot 0,5}} = 26 \text{ Вт.}$$

Суммарные тепловые потери водонагревателя:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{бок}} + \Phi_k - \Phi_d = 74 + 26 - 50 = 50 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность водонагревателя:

$$P_{\text{пол}} = \frac{c \cdot L \cdot \delta \cdot (t_2 - t_1)}{3600} = \frac{4,19 \cdot 0,1 \cdot 1000 \cdot (85 - 5)}{3600} = 9,3 \text{ кВт.}$$

Установленная мощность водонагревателя при коэффициенте запаса 1,0:

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{пол}} + \Phi_{\Sigma} = 9300 + 50 = 9350 \text{ Вт.}$$

КПД водонагревателя:

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{уст}}} = \frac{9300}{9350} = 0,99.$$

### Контрольные задания

1. Для закалки стальную деталь, нагретую до температуры  $t_1 = 1073 \text{ К}$ , массой  $m_1 = 0,5 \text{ кг}$  опустили в воду массой  $m_2 = 10 \text{ кг}$  при температуре  $t_2 = 288 \text{ К}$ . Удельная теплоемкость стали  $c_1 = 460 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ , а удельная теплоемкость воды  $c_2 = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ . До какой температуры охладится стальная деталь?

2. В электрический чайник мощностью  $P = 1800 \text{ Вт}$  с двумя литрами воды при температуре  $t_1 = 60^\circ\text{C}$  долили воды  $V_2$  при температуре  $t_2 = 70^\circ\text{C}$ . Нагрев осуществляется с КПД  $\eta = 60\%$ . Вся вода в чайнике нагревается до температуры  $t_3 = 90^\circ\text{C}$  через 5 мин. Чему равен объем нагретой воды  $V$ ? Теплоемкостью чайника можно пренебречь.

3. Вода нагревается на электрической плитке постоянной мощности. На что потребуется больше времени – чтобы нагреть её от  $10$  до  $20^\circ\text{C}$  или от  $80$  до  $90^\circ\text{C}$ ? Приведите анализ реальной ситуации.

4. Определить полезную мощность ЭТУ для плавки олова массой  $m = 10 \text{ кг}$ , если олово поступает в установку при температуре  $t_1 = 7^\circ\text{C}$ , а

после расплавления нагревается до температуры  $t_2 = 260^\circ\text{C}$ . Время нагрева и расплавления  $\tau = 110$  мин. Температура плавления олова  $t_{пл} = 232^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость твердого олова  $c_m = 0,65$  кДж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$ ); удельная теплоемкость жидкого олова  $c_{ж} = 0,57$  кДж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$ ); удельная теплота плавления  $a_{пл} = 207$  кДж/кг.

5. Полезно затрачиваемая мощность электронагревательного устройства 10 кВт, тепловые потери равны 4,8 кВт. Найти КПД электронагревательного устройства. Как изменится КПД электронагревательного устройства после его модернизации, если в результате пересчета нагревательных элементов на большую мощность продолжительность нагрева материала удалось сократить с 2 до 1 ч.

6. Определить тепловой поток излучением от стенки поверхностью  $F = 4,0$  м<sup>2</sup>, если степень черноты материала, из которого она изготовлена,  $\varepsilon = 0,92$ , а температура –  $t_{cm} = 1200^\circ\text{C}$ . Коэффициент излучения абсолютно черного тела равен  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

7. Материал с каким максимальным коэффициентом теплопроводности целесообразно использовать для изоляции трубопровода с наружным диаметром  $D = 300$  мм, коэффициент теплоотдачи которого к окружающему воздуху  $\alpha = 8$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

8. Плоская стальная стенка технологического агрегата с  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·°C) и толщиной  $d_1 = 0,02$  м теплоизолирована слоем асбестового картона с  $\lambda_2 = 0,15$  Вт/(м·°C) толщиной  $d_2 = 0,2$  м и слоем стекловаты с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3 = 0,05$  Вт/(м·°C) толщиной  $\Delta_3 = 0,1$  м. Какой толщины необходимо сделать изоляцию из пенобетона с  $\lambda_4 = 0,08$  Вт/(м·°C) вместо асбеста и стекловаты, чтобы теплоизоляционные свойства стенки остались без изменений.

9. Внутренние габариты печи для закалки ремонтных тракторных деталей  $a \times b \times c = 500 \times 500 \times 500$  мм. Толщина тепловой изоляции из огнеупорной кладки из шамотного кирпича  $\Delta_{ш} = 115$  мм, а из минеральной ваты –  $\Delta_{мв} = 200$  мм. Определить тепловые потери печи, если температура ее внутреннего пространства  $t_{вн} = 950^\circ\text{C}$ .

10. Рассчитать мощность печи для нагрева под закалку стальных деталей диаметром  $D = 100$  мм и длиной  $l = 250$  мм. В печь одновременно укладывается  $n = 10$  деталей. Продолжительность нагрева  $\tau = 2$  ч. Температура закалки  $t_3 = 870^\circ\text{C}$ . КПД печи  $\eta = 75\%$ .

11. Варочный котел сферической формы с наружным диаметром  $D = 1200$  мм =  $1200 \cdot 10^{-3}$  м сделан из нержавеющей стали с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{cm} = 18$  Вт/(м·°C). Толщина стенки котла  $\Delta_{cm} = 10$  мм =  $10 \cdot 10^{-3}$  м. Внутри находится жидкость с температурой  $t_{ж} = 140^\circ\text{C}$ ; снаружи котел покрыт слоем асбеста с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_a = 0,15$  Вт/(м·°C) толщиной  $\Delta_a = 60$  мм =  $60 \cdot 10^{-3}$  м. В цехе температура воздуха  $t_{a1} = 40^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи снаружи и

внутри котла соответственно  $\alpha_2 = 18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  и  $\alpha_1 = 600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . После включения вентиляции в цехе температура воздуха снизилась до  $t_{в2} = 25^\circ\text{С}$ , а коэффициент теплоотдачи от стенки котла к воздуху увеличился в 1,5 раза. На сколько процентов возросли потери теплоты котлом?

12. Бак водонагревателя цилиндрической формы имеет вместимость  $0,4 \text{ м}^3$ . Температура воды в баке  $85^\circ\text{С}$ , а окружающей среды  $15^\circ\text{С}$ . Толщина тепловой изоляции бака водонагревателя, изготовленная из листового асбеста,  $0,04 \text{ м}$ . Определить мощность тепловых потерь с боковой и торцевой поверхностей водонагревателя при оптимальных геометрических размерах бака.

### Контрольные вопросы

1. Дайте понятие теплопроводности, конвекции и теплового излучения.
2. Проведите аналогию между тепловой и электрической цепями.
3. Как определить полезную мощность, затрачиваемую на нагрев?
4. Что такое расчетная мощность электронагревательной установки и как она определяется?
5. Что такое установленная мощность электронагревательной установки?
6. Что такое коэффициент теплоотдачи и в каких единицах он измеряется?
7. Что такое коэффициент теплопроводности материала (среды) теплоотдачи и в каких единицах он измеряется?
8. Как определить термическое сопротивление при теплопередаче теплопроводностью через однослойную стенку?
9. Дайте понятие удельной поверхностной мощности, термического сопротивления.
10. Как определить термическое сопротивление при теплопередаче конвекцией?

## 2. Электрический нагрев сопротивлением металлических проводников

### 2.1. Общие сведения из теории электропроводности проводников первого рода

Электрический нагрев сопротивлением организуется путем включения проводника (проводящей среды) в электрическую цепь и пропускания по нему электрического тока  $I$ . Если ток неизменен, то, при постоянном сопротивлении проводника  $R$ , количество теплоты  $Q$ , выделенное в проводнике в течение некоторого промежутка времени  $\tau$ , определяется согласно закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau. \quad (2.1)$$

Данный вид нагрева является наиболее простым способом преобразования электрической энергии в тепловую. Прямой электронагрев сопротивлением применяется только для электропроводящих материалов и носит название электроконтактного нагрева, а косвенный используется для нагрева проводящих и непроводящих материалов и сред.

Сопротивление проводника, имеющего неизменное по длине  $l$  сечение  $F$ , в простейшем случае определяется по формуле

$$R = \rho \cdot \frac{l}{F}, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м или Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – длина проводника, м;  $F$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  зависит от материала проводника, содержания примесей, механической и термической обработки, температуры.

У металлов удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , как правило, с повышением температуры  $t$  возрастает и для практических расчетов его можно определить по следующей формуле

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ\text{C})), \quad (2.3)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление проводника при 20°C, Ом·м;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, 1/°C.

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  имеет размерность  $1/^\circ\text{C}$  и является одной из важных физических характеристик проводниковых материалов.

Активное сопротивление металлических проводников переменному току больше омического вследствие поверхностного эффекта и определяется как:

$$R_{\sim} = k_n \cdot \rho \cdot \frac{l}{F}, \quad (2.4)$$

где  $k_n = \frac{R_{\sim}}{R_{=}}$  – коэффициент поверхностного эффекта.

Поверхностный эффект проявляется в убывании по экспоненте плотности тока от поверхности в глубь проводника вследствие затухания падающей на проводник электромагнитной волны. Коэффициент  $k_n$  представляет собой сложную функцию физических свойств материала, размеров проводника и частоты тока.

В приближенных расчетах коэффициент поверхностного эффекта можно определить по следующим формулам:

$$k_n = 1 + \frac{a^4}{3} \text{ при } a < 1, \quad (2.5)$$

$$k_n = a + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot a} \text{ при } a > 1, \quad (2.6)$$

где  $a$  – безразмерный параметр, который, например, для цилиндрического проводника можно определить по формуле

$$a = \frac{d}{4 \cdot z_0}, \quad (2.7)$$

где  $d$  – диаметр цилиндрического проводника, м;  $z_0$  – глубина проникновения электромагнитной волны в металл, м.

Глубина проникновения электромагнитной волны в металл находится по приближённой формуле следующего вида:

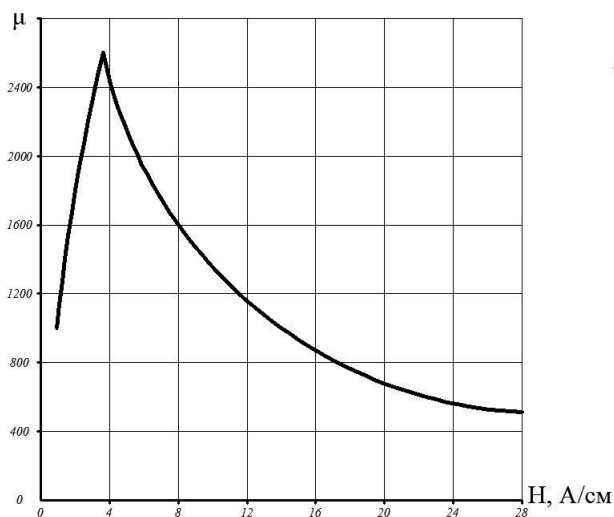
$$z_0 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}, \quad (2.8)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала, которая зависит от напряженности магнитного поля (Н);  $f$  – частота переменного тока, Гц.

Глубина проникновения тока для немагнитных металлов также может быть определена по справочным данным (табл. П. 1).

У ферромагнитных материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью, глубина проникновения токов гораздо меньше, чем у немагнитных, вследствие этого у ферромагнитных материалов поверхностный эффект заметно проявляется даже на промышленной частоте. Это явление существенно усложняет расчет стальных нагревателей и установок электроконтактного нагрева стальных деталей.

Относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  ферромагнитных материалов является функцией напряженности магнитного поля  $H$  и температуры. С возрастанием напряженности магнитного поля от нуля значение относительной магнитной проницаемости вначале также растет, а затем, достигнув критического значения, уменьшается (рис. 2.1). При больших напряженностях магнитного поля, наблюдающихся в электронагревателях, значение  $\mu_r$  сравнительно невелико и мало влияет на изменение сопротивления нагревателей.



**Рис. 2.1. Зависимость относительной магнитной проницаемости материала от напряженности магнитного поля  $\mu_r = f(H)$  для углеродистых сталей**



При повышении температуры значение относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  снижается сравнительно медленно, но при достижении точки Кюри, так например: для чистого железа  $t_k=786^\circ\text{C}$ , углеродистой стали  $t_k=721^\circ\text{C}$ , сразу падает до единицы. При этом интенсивность теплового движения молекул оказывается достаточной для разрушения намагниченности тела и в результате чего ферромагнетик теряет свои магнитные свойства.

Напряженность магнитного поля,  $H$ , А/см, определяется по формуле

$$H = \frac{I}{\pi \cdot d} , \quad (2.9)$$

где  $I$  – величина тока, протекающего по проводнику, А;  $d$  – диаметр проводника, см.

## 2.2. Расчет установок электроконтактного нагрева

Электроконтактный нагрев связан с преобразованием электрической энергии в тепло непосредственно в металлическом нагреваемом изделии (детали) и применяется для заготовок или деталей из чёрных и цветных металлов, термической обработки (закалка, отпуск, отжиг), а также контактной электрической сварки давлением.

Электроконтактный нагрев имеет следующие преимущества: высокую производительность при малых габаритах установки; практическое отсутствие потерь металла на окалину; увеличение срока службы оборудования для обработки металлов давлением, на износ которого серьезно влияет наличие окалины; неограниченную температуру нагрева, ввиду отсутствия нагревателей; малые тепловые потери и возможность обойтись без футеровки; повышенную равномерность нагрева.

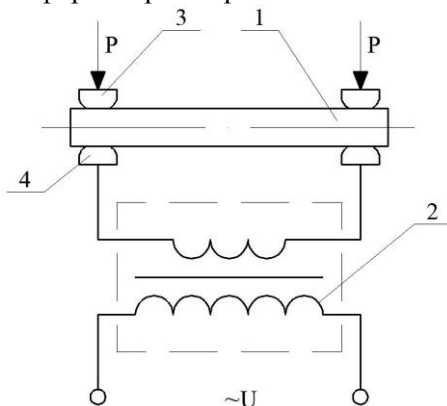
К недостаткам электроконтактного нагрева, в первую очередь, следует отнести: трудность в создании контактов, удовлетворительно работающих при высоких токах, а также трудность измерения и автоматического регулирования температуры.

Количество теплоты при электроконтактном нагреве, выделяемое в единицу времени, то есть мощность, Вт, можно определить по формуле

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.10)$$

Электроконтактный нагрев деталей простой формы (валов, осей, лент) (рис. 2.2) применяют, если необходимо их подвергнуть последующей термической и механической обработке. Деталь (заготовку) 1 включают в электрическую цепь и нагревают протекающим по ней электрическим током. Так как сопротивление детали мало, то, согласно уравнению (2.1), для нагрева необходим ток большой силы, который подводят к ней при помощи массивных медных или бронзовых зажимов (контактов) 3 и 4, размещенных во вторичной обмотке понижающего трансформатора 2.

Так как сопротивление металлических тел с хорошей проводимостью небольшое, для прямого их нагрева требуются значительные токи (сотни и тысячи ампер) при напряжении всего  $U = 5 \dots 25 \text{ В}$ . Поэтому для этих целей применяют переменный ток благодаря относительной простоте получения низкого напряжения при помощи трансформаторов переменного тока.



**Рис. 2.2. Простейшая схема установки для электроконтактного нагрева:**

1 – деталь (заготовка); 2 – понижающий трансформатор; 3, 4 – зажимы (контакты)

Трудность подвода тока к нагреваемым деталям является одним из существующих недостатков контактного способа нагрева. Зажимы (3 и 4) должны иметь хороший контакт с деталью. При практической реализации их соприкосновение происходит в нескольких точках, и сопротивление контактного перехода велико, причем часто соизмеримо с сопротивлением самой заготовки.

Элементы вторичной цепи (вторичная обмотка трансформатора, подводящие шины, сопротивления в переходных контактах) включаются в электрическую цепь последовательно с заготовкой, и в каждом из них выделяется тепло, пропорциональное сопротивлению соответствующего элемента электрической цепи. Сопротивление этих элементов следует всячески уменьшать. Для этого трансформатор располагают как можно ближе к детали (заготовке), уменьшают переходные сопротивления в контактах и т.д. Особую трудность представляет обеспечение малых значений переходных сопротивлений контактных зажимов. Вследствие больших токов во вторичной цепи даже малое сопротивление в переходных контактах приводит к значительному выделению тепла в концах заготовок и, следовательно, к неравномерному распределению температуры по ее длине. Так, например, при сопротивлении в контактах, равном 0,01 Ом, и силе тока  $10^3$  А в них выделяется тепло, эквивалентное 10 кВт мощности. Для снижения переходного сопротивления необходимо усилить давление в контактах. В промышленных установках для этого применяют пневматические и гидравлические приводы, а для снижения температуры в контактах их изготавливают водоохлаждаемыми.

При протекании переменного тока у металлических деталей проявляется поверхностный эффект, заключающийся в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника, которая экспоненциально уменьшается по направлению к его оси, т.е.:

$$j_x = j_m \cdot e^{-x/z_0}, \quad (2.11)$$

где  $j_x$  – плотность тока в слое проводника на расстоянии  $x$ , м, от поверхности, А/мм<sup>2</sup>;  $j_m$  – плотность тока в слое проводника на поверхности проводника, А/мм<sup>2</sup>;  $z_0$  – эквивалентная глубина проникновения тока, м.

При глубине проникновения тока  $x = z_0$ , считается, что в этом слое выделяется около 90% общего количества теплоты.

Эквивалентная глубина проникновения тока – это расстояние от поверхности проводника, на котором плотность тока в  $e = 2,71$  раза меньше, чем на поверхности и если нагрев осуществляется на частоте  $f=50$  Гц, то она равна:

$$z_0 = 71,2 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r}}. \quad (2.12)$$

Для каждого металла эквивалентная глубина проникновения тока  $z_0$  имеет своё значение.

В заготовках, особенно из ферромагнитных материалов, вследствие поверхностного эффекта ток по сечению распределяется неравномерно, следовательно, неравномерно распределяется и температура. Однако к концу нагрева температура по сечению заготовки не только выравнивается, но и часто в центре становится больше, чем на поверхности. Выравнивание происходит как вследствие высокой теплопроводности металлов, так и за счет теплоотдачи излучением от наружной поверхности в связи с тем, что тепловой поток излучением пропорционален  $T^4$ .

Потребная (расчетная) активная мощность трансформатора:

$$P_{нотр} = \frac{P_{пол}}{\eta} = \frac{P_{пол}}{\eta_m \cdot \eta_\varepsilon \cdot \eta_{тр}}, \quad (2.13)$$

где  $\eta_m$  – термический КПД установки;  $\eta_\varepsilon$  – электрический КПД установки;  $\eta_{тр}$  – КПД трансформатора, принимают равным  $\eta_{тр} = 0,94$ .

Чтобы суммарный КПД  $\eta$  был максимальным по значению, необходимо, чтобы значение суммарного сопротивления вторичной обмотки понижающего трансформатора, соединительных проводов и контактов было минимальным.

Мощность, подсчитанная по формуле (2.13), является средней за период нагрева, так как удельная теплоемкость материала заготовки (детали)  $c$  и КПД  $\eta$  зависят от температуры и, следовательно, в процессе нагрева изменяются. При нагреве стальных деталей мощность к концу нагрева возрастает в 1,3...1,4 раза.

Скорость нагрева зависит от подводимого к изделию напряжения. Изменяя напряжение, можно создавать любую интенсивность нагрева и соответствующие температурные режимы. Однако существуют технические и технологические факторы, ограничивающие скорость нагрева, такие как трудность подвода к заготовке больших токов, неравномерное распределение температуры по сечению детали и т.д.

Продолжительность нагрева зависит от диаметра заготовок и допустимого температурного перепада между поверхностными и внутренними слоями. Для стальных заготовок цилиндрической формы продолжительность нагрева определяют по формуле

$$\tau = \frac{m_l}{\Delta P} \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.14)$$

где  $m_l$  – масса детали (заготовки) длиной в один метр, кг/м;  $\Delta P$  – средняя интенсивность подвода энергии на единицу длины нагреваемой части детали (заготовки), кВт/м, эмперически определено, что  $\Delta P = 160 \dots 250$  кВт/м.

Чем больше диаметр заготовки, тем большую мощность можно к ней подводить, тем выше скорость нагрева.

Установки электродного нагрева выполняют без тепловой изоляции, так как скорость нагрева у них очень высокая и тепловые потери в окружающую среду не играют существенной роли.

Электродный нагрев применяют главным образом для деталей, имеющих одинаковое сечение по длине. При этом термический КПД можно определить по формуле

$$\eta_m = \frac{P_{\text{пол}} \cdot R_{\Sigma}}{U_2^2} = \frac{P_{\text{пол}} \cdot \left[ \frac{\rho \cdot l}{F} \right]}{U_2^2}. \quad (2.15)$$

Термический КПД ( $\eta_m$ ) учитывает в основном потери на нагрев ограждающих конструкций. Его значение зависит от геометрических размеров нагреваемой заготовки: чем выше отношение длины  $l$  детали к её поперечному сечению  $F$ , тем выше  $\eta_m$ .

Для тел цилиндрической формы термический КПД можно приближенно определить по эмпирической формуле

$$\eta_m = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{d} \cdot \left( 0,1 + \frac{1}{l} \right)}, \quad (2.16)$$

где  $\tau$  – продолжительность нагрева, с;  $d$ ,  $l$  – диаметр и длина нагреваемой части детали (заготовки), см.

Эмпирически определенное значение  $\eta_m$  находится в пределах 0,7-0,95. Большие значения соответствуют большим диаметрам заготовок и большей скорости нагрева.

Для сквозного нагрева принципиально может быть использован также и постоянный ток.

Электрический КПД учитывает потери в токоподводящих элементах и определяется по формуле

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot d \cdot R_1}{4 \cdot \rho \cdot l}}, \quad (2.17)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала детали (заготовки), Ом·м;  $R_1$  – электрическое сопротивление токоподводящих шин и контактов, Ом.

**Расчёт и выбор нагревательных трансформаторов.** В устройствах и установках электроконтактного нагрева определяют не параметры нагревательных устройств, а параметры источника питания.

Для выбора трансформатора необходимо знать полную мощность  $S_{тр}$  и вторичное напряжение  $U_2$ .

Если известна масса детали  $m$ , кг; начальная  $t_1=t_{нач}$  и конечная  $t_2=t_{кон}$  температура, °С, а также время  $\tau$ , с, в течении которого осуществляется нагрев, то полезно расходуемую мощность, Вт, можно определить по формуле

$$P_{пол} = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (2.18)$$

Общая потребная мощность  $P_{номр}$  рассчитывается по формуле (2.13).

Полная мощность трансформатора, В·А:

$$S_{тр} = \frac{k_3 \cdot P_{номр}}{\cos} \sqrt{ПВ} = \frac{k_3 \cdot P_{пол}}{\eta \cdot \cos} \sqrt{ПВ}, \quad (2.19)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса;  $\eta$  – КПД установки;  $\cos\varphi$  – средний  $\cos\varphi$  (его значения лежат в диапазоне 0,6...0,85);  $ПВ$  – относительная продолжительность включения.

Значения  $\eta$  и  $\cos\varphi$  зависят от соотношения  $l/d^2$ , где  $l$  – длина заготовки (детали),  $d$  – диаметр заготовки. Примерные значения  $\eta$  и  $\cos\varphi$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

**Значения КПД ( $\eta$ ) и коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) установки электроконтактного нагрева в зависимости от размеров заготовки (детали)**

Показатели	$l/d^2, \text{ см}^{-1}$										
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\eta$	0,5	0,62	0,69	0,73	0,76	0,78	0,8	0,815	0,82	0,825	0,825
$\cos\varphi$	0,64	0,7	0,745	0,775	0,8	0,82	0,825	0,84	0,845	0,846	0,846

Так как нагревательные трансформаторы обычно работают в повторно-кратковременном режиме, поэтому продолжительность включения можно определить по формуле

$$ПВ = \frac{\tau_p}{\tau_u} = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_{паузы}}. \quad (2.20)$$

Вторичное напряжение трансформатора можно найти по соотношению, В:

$$U_2 = \sqrt{\frac{R_{\sim} \cdot P_{пол}}{\eta_m}}. \quad (2.21)$$

Сопротивление заготовки (детали) на переменном токе определяется по формуле, Ом:

$$R_{\sim} = k_n \cdot \rho \cdot \frac{l}{F}. \quad (2.22)$$

При вычислении удельного электрического сопротивления  $\rho$  для стальных заготовок следует учитывать три члена ряда, Ом·м:

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta + \alpha^2 \cdot \theta^2), \quad (2.23)$$

так как температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  у стали велик и если не учитывать третий член в приведенном выражении, то это приводит к значительным погрешностям.

Так как за время нагрева сопротивление  $R_{\sim}$  и мощность  $P_{пол}$  изменяются, то в формуле (2.19) следует брать средние их значения.

Напряжение холостого хода трансформатора складывается из напряжения на заготовке  $U$  в рабочий период и потерь во вторичной цепи  $\Delta U$ , которое определяют расчетом или берут по опытным данным, В:

$$U_x = U + \Delta U. \quad (2.24)$$

Мощность нагрева регулируют изменением подводимого к заготовке напряжения. Для этого первичную, а иногда и вторичную обмотки нагревательного трансформатора разделяют на секции. Необходимую мощность получают включением секции по определённой схеме.

Нагревательные трансформаторы имеют специальное конструктивное исполнение, позволяющее получать большие токи во вторичной цепи при низких напряжениях. Вторичная обмотка обычно состоит из одного или нескольких массивных витков.

В мощных установках их делают водоохлаждаемыми. Обмотки трансформаторов выполняют с теплостойкой изоляцией. По устройству трансформаторы для электроконтактной сварки и наплавки аналогичны.

### 2.3. Расчет установок для электроконтактной сварки

**Стыковая контактная электрическая сварка.** Этот вид контактной сварки применяется, например, для соединения встык проволоки и стержней арматуры, для приварки к арматурным стержням концов с резьбой используемых при натяжении армированных конструкций и т.п. Контактная сварка включает в себя два процесса: нагрев металла и сдавливание или осадку нагретого металла, обеспечивающие его деформацию. Сила сварочного тока при этом варьируется от нескольких сот до десятков тысяч ампер, а усилия осадки – от нескольких сотен до десятков тысяч ньютонов.

Различают контактную стыковую сварку сопротивлением и оплавлением. Количество тепла, выделяемое между электродами или колодками контактной машины и расходуемое на нагревание свариваемых деталей, составляет, Дж:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) = I_{св}^2 \cdot (R_m + R_k) \cdot \tau, \quad (2.25)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость свариваемого металла, Дж/(кг·°C);  $\tau$  – продолжительность сварки (нагрева), с;  $I_{св}$  – сварочный ток, А;  $R_m, R_k$  – активное сопротивление металла свариваемых деталей и контакта между ними, Ом;  $m$  – масса нагреваемой части свариваемых деталей, кг.

С увеличением усилия сдавливания контактное сопротивление уменьшается. Сопротивление контакта  $R_k$  при сварке сопротивлением всегда меньше сопротивления контакта  $R_k$  при сварке оплавлением.

При стыковой сварке стальных стержней сопротивлением плотность тока должна быть в пределах от 25 до 120 А/мм<sup>2</sup>. Соотношение между плотностью сварочного тока и продолжительностью его протекания выражается зависимостью:

$$j \cdot \sqrt{\tau} \approx 100. \quad (2.26)$$



Плотность тока при оплавлении без предварительного прогрева в зависимости от площади сечения деталей, например стержней, колеблется в пределах от 8 до 40 А/мм<sup>2</sup>.

Для нормального процесса непрерывного оплавления между свариваемым током  $I_{св}$ , А, длительностью оплавления  $\tau$ , с, и диаметром детали  $d$ , мм, существует следующая зависимость:

$$I_{св} = \sqrt{d^3 \cdot (3 \cdot \tau + 1)} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (2.27)$$

**Точечная контактная электрическая сварка.** Этот вид контактной сварки применяется, например, для изготовления сеток и каркасов, которые являются основным элементом армирования железобетонных изделий в строительстве.

Режим точечной сварки назначается в зависимости от типа и толщины свариваемых деталей и характеризуется диаметром контактной поверхности электродов  $d_э$ , силой сварочного тока  $I_{св}$ , напряжением сварки  $U_{св}$ , усилием сжатия  $p_{сж}$ , продолжительностью этапов сжатия  $\tau_{сж}$ , сварки  $\tau_{св}$  и проковки  $\tau_{пр}$ .

Точечную сварку малоуглеродистой стали осуществляют на «мягких» и «жестких» режимах. В массовом производстве точечная сварка чаще всего производится на «жестких» режимах, которые характеризуются большой скоростью и маленькой продолжительностью нагрева и, следовательно, более высокой производительностью.

Размеры и структура металла сварной точки, определяющие прочность сварного соединения, зависят от размеров и формы контактной поверхности электродов, усилия их сжатия. При сварке низкоуглеродистых сталей используются электроды с плоской рабочей поверхностью, а высокоуглеродистые и легированные стали, медные и алюминиевые сплавы сваривают электродами со сферической поверхностью.

От диаметра контактной поверхности электрода  $d_э$  зависит плотность электрического тока, электрическое сопротивление свариваемого участка, удельное давление в процессе нагрева и диаметр сварной точки (литого ядра)  $d_o$ , мм:

$$d_o = 5,5 \cdot \sqrt{\Delta}, \quad (2.28)$$

где  $\Delta$  – толщина более тонкой из свариваемых деталей, мм.

Диаметр контактной поверхности электрода  $d_3$ , мм, выбирается в зависимости от толщины свариваемых листов и качества материалов. В среднем для стали он принимается равным, мм:

$$d_3 = (1,5 \dots 2,0) \cdot \Delta + 3. \quad (2.29)$$

Величину сварочного тока  $I_{св}$  можно определить по зависимости, А:

$$I_{св} = j \cdot F_3, \quad (2.30)$$

где  $j$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $F_3$  – площадь контактной поверхности электрода, мм<sup>2</sup>.

При сварке листов различной толщины выбор параметров производится по условию достаточности нагрева и деформации более тонкого листа.

Сварка на мягких режимах сопровождается образованием широкой зоны разогрева, что облегчает деформирование металла и позволяет ограничиться не очень высокими требованиями к точности правки заготовок, как, например, при жестких режимах. Так как время нагрева повышено, степень влияния теплоты от быстро исчезающего контактного сопротивления на общий нагрев здесь несколько снижается, поэтому могут быть снижены и требования к тщательности подготовки поверхности заготовок. Электрическая и механическая мощность при сварке на мягких режимах требуется более умеренная, чем при сварке на жестких режимах.

Жесткие режимы обеспечивают более высокую производительность и меньший расход энергии. Ввиду того, что поверхность деталей под электродами при жестких режимах нагревается сравнительно меньше, электроды нагреваются слабее и, несмотря на рост давления, расход их снижается. Заметно уменьшается глубина вмятия в месте сварки и коробление изделия. В целом жесткие режимы целесообразны, прежде всего, в массовом производстве, где выигрыш в производительности и расходе энергии полностью окупит дополнительные расходы, связанные с приобретением, эксплуатацией и питанием более мощного оборудования.

Плотность тока при сварке малоуглеродистой стали на «мягком» режиме принимается в пределах 100...140 А/мм<sup>2</sup>, а на «жестком» режиме – 200...400 А/мм<sup>2</sup>.

С увеличением толщины листов плотность тока снижается. Когда металл свариваемых деталей обладает повышенной тепло- и электропроводностью, плотность тока должна увеличиваться. Так,

при сварке алюминия или его сплавов плотность тока иногда достигает  $1000 \text{ А/мм}^2$  и выше. Плотность тока должна выбираться большей когда по каким-нибудь соображениям давление принимается повышенным.

Длительность включения  $\tau_{св}$  (от сотых долей секунды до нескольких секунд) сварочного трансформатора зависит от толщины металла, его химического состава, усилия сжатия и определяется по зависимости, с:

$$\tau_{св} = (0,1 \dots 0,25) \cdot \Delta. \quad (2.31)$$

Меньшее время нагрева брать не рекомендуется, так как случайные, даже незначительные погрешности в работе регулятора времени могут вызвать серьезные отклонения от требуемого нагрева и качества сварки.

Продолжительность сжатия деталей  $\tau_{сж}$  до включения сварочного тока возрастает с увеличением толщины металла и находится в пределах, с:

$$\tau_{сж} = 0,3 \dots 0,8. \quad (2.32)$$

Длительность сжатия свариваемых деталей после выключения тока (проковка)  $\tau_{пр}$  оказывает влияние на качество сварной точки и лежит в интервале, с:

$$\tau_{пр} = 0,1 \dots 1,2. \quad (2.33)$$

Для сварки металлов с высокой теплопроводностью время сварки принимается малым, при большой силе тока. Для сварки закаливающихся сталей, наоборот, во избежание образования закалочных трещин при быстром охлаждении, время нагрева часто приходится увеличивать – при соответствующем снижении тока. Детали должны оставаться сжатыми до завершения процесса застывания металла в ядре точки. Меньшие значения времени берутся для металла малой толщины.

Усилие сжатия  $p_{сж}$  деталей между электродами возрастает с увеличением толщины свариваемых деталей и для малоуглеродистой стали находится по формуле, кг,

$$p_{сж} = (60 \dots 20) \cdot \Delta. \quad (2.34)$$

Режимы точечной сварки низколегированных и углеродистых сталей отличаются от режимов сварки малоуглеродистых сталей в основном повышением усилия сжатия электродов на  $15 \dots 30\%$ .

## Примеры решения задач

**Задача 2.1.** Определить соотношение мощностей электронагревательных устройств, нагревательным элементом которых является металлическая проволока, учтя следующие режимы работы:

1) Проволока из малоуглеродистой стали ( $\rho_{20cm} = 0,135 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $\alpha_{cm} = 4500 \cdot 10^{-6} = 0,0045 \cdot 1/^\circ\text{C}$ ) диаметром  $d = 3$  мм и длиной  $l = 282$  м, нагреваемая до температуры  $+50^\circ\text{C}$ , подключена к сети:

а) переменного тока промышленной частоты  $f = 50$  Гц на напряжение  $U_C = 48$  В;

б) постоянного тока на напряжение  $U_C = 48$  В.

2) Проволока из малоуглеродистой стали ( $\rho_{20cm} = 0,135 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $\alpha_{cm} = 4500 \cdot 10^{-6} = 0,0045 \cdot 1/^\circ\text{C}$ ) диаметром  $d = 3$  мм и длиной  $l = 212$  м, нагреваемая до температуры  $+200^\circ\text{C}$ , подключена к сети:

а) переменного тока промышленной частоты  $f = 50$  Гц на напряжение  $U_C = 220$  В;

б) постоянного тока на напряжение  $U_C = 220$  В.

3) Нихромовая проволока ( $\rho_{20m} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) диаметром  $d = 3$  мм и длиной  $l = 47$  м, нагреваемая до температуры  $+100^\circ\text{C}$ , подключена к сети:

а) переменного тока промышленной частоты  $f = 50$  Гц на напряжение  $U_C = 220$  В;

б) постоянного тока на напряжение  $U_C = 220$  В.

### Решение

#### Решение 1

а) Ток, протекающий по нагреваемой стальной проволоке:

$$I = \frac{U_C}{R_t},$$

где  $R_t$  – сопротивление стальной проволоки при конкретном значении температуры  $t$ , которое определяется по формуле

$$R_t = \rho \cdot \frac{l}{F} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot r^2}.$$

Удельное сопротивление стали при  $t = 50^\circ\text{C}$ , равно значению:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \rho_{20cm} (1 + \alpha_{cm} (t - 20)) = 0,135 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0045(50 - 20)) = \\ &= 0,148 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Отсюда сопротивление проводника при  $t_1 = 50^\circ\text{C}$  и  $\rho_l = 0,148 \cdot 10^{-4}$  Ом·см:

$$R_{l1} = 0,148 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{282 \cdot 10^2}{3,14 \cdot 0,15^2} = 6 \text{ Ом.}$$

Ток нагрузки и напряженность магнитного поля на поверхности стальной проволоки можно определить следующим образом:

$$I_1 = \frac{U_c}{R_{l1}} = \frac{48}{6} = 8 \text{ А; } H_1 = \frac{I_1}{\pi \cdot d} = \frac{8}{3,14 \cdot 0,3} = 6,6 \text{ А/см.}$$

Данному значению напряженности магнитного поля соответствует относительная магнитная проницаемость  $\mu_{rcm1} = 1800$  (рис. 2.1).

Тогда глубина проникновения тока в металл равна:

$$z_{01} = 5030 \sqrt{\frac{\rho_l}{\mu_{rcm1} \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{0,148 \cdot 10^{-4}}{1800 \cdot 50}} = 0,0645 \text{ см.}$$

Безразмерный параметр:

$$a_1 = \frac{d}{4 \cdot z_{01}} = \frac{0,3}{4 \cdot 0,0645} = 1,162.$$

Коэффициент поверхностного эффекта, при значении  $a > 1$ , будет равен:

$$k_{n1} = a_1 + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot a_1} = 1,162 + 0,25 + \frac{3}{64 \cdot 1,162} = 1,45.$$

Сопротивление переменному току равно:

$$R_{\sim 1} = k_{n1} \cdot R_{l1} = 1,45 \cdot 6 = 8,7 \text{ Ом.}$$

Мощность, выделяемая в проводнике на переменном токе:

$$P_{\sim 1} = \frac{U_c^2}{R_{\sim 1}} = \frac{48^2}{8,7} = 264 \text{ Вт.}$$

б) При нагреве на постоянном токе стального проводника, его сопротивление составит 6 Ом, поэтому потребляемая мощность будет равна:

$$P_{=1} = \frac{U_c^2}{R_{l1}} = \frac{48^2}{6} = 384 \text{ Вт.}$$

Определим соотношение мощности нагревательной установки на постоянном и переменном токах:

$$\Delta P_1 = \frac{P_{=1} - P_{\sim 1}}{P_{=1}} \cdot 100 = \frac{384 - 264}{384} \cdot 100 \approx 31\% .$$

Таким образом, можно констатировать, что вследствие проявления поверхностного эффекта мощность на переменном токе при одинаковых условиях уменьшается на 31% по сравнению с постоянным током.

### Решение 2

а) Для определения сопротивления стальной проволоки, нагреваемой до температуры 200°C, необходимо найти удельное электрическое сопротивление материала нагревателя  $\rho_2$  при заданной температуре:

$$\rho_2 = 0,135 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,0045 \cdot (200 - 20)) = 0,244 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$R_{l2} = 0,244 \cdot 10^{-4} \frac{212 \cdot 10^2}{3,14 \cdot 0,15^2} = 7,33 \text{ Ом};$$

Ток нагрузки и напряженность магнитного поля на поверхности стальной проволоки определим следующим образом:

$$I_2 = \frac{U_c}{R_{l2}} = \frac{220}{7,33} = 30 \text{ А}; \quad H_2 = \frac{I_2}{\pi \cdot d} = \frac{30}{3,14 \cdot 0,3} = 31,8 \text{ А/см}.$$

При данном значении напряженности магнитного поля находим, что относительная магнитная проницаемость  $\mu_{rcm2} = 400$  (рис. 2.1).

Глубина проникновения электромагнитного поля в металл составит:

$$z_{02} = 5030 \sqrt{\frac{0,244 \cdot 10^{-4}}{400 \cdot 50}} = 0,176 \text{ см}.$$

Безразмерный параметр равен:

$$a_2 = \frac{d}{4 \cdot z_{02}} = \frac{0,3}{4 \cdot 0,176} = 0,426.$$

Коэффициент поверхностного эффекта, при значении  $a < 1$ , равен:

$$k_{n2} = 1 + \frac{0,426^4}{3} = 1,011.$$

Сопротивление переменному току и потребляемая установкой мощность равны:

$$R_{\sim 2} = k_{n2} \cdot R_{t2} = 1,011 \cdot R_{t2} = 1,011 \cdot 7,33 = 7,41 \text{ Ом};$$

$$P_{\sim 2} = \frac{U_c^2}{R_{\sim 2}} = \frac{220^2}{7,41} = 6,53 \text{ кВт}.$$

б) При нагреве на постоянном токе стального проводника, его сопротивление составит 7,33 Ом, поэтому потребляемая мощность будет равна:

$$P_{=2} = \frac{U_c^2}{R_{t2}} = \frac{220^2}{7,33} = 6,6 \text{ кВт}.$$

Таким образом можно констатировать, что при увеличении глубины проникновения поверхностный эффект проявляется меньше и разность мощностей уменьшается.

### Решение 3

В случае применения проволоки из нихрома марки Х20Н80-Н для которого  $\rho_{20n}=1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м и  $\alpha_n=16,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , можно пренебречь увеличением сопротивления нихрома вследствие нагрева и тогда:

$$R_{nn} = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{47 \cdot 10^2}{3,14 \cdot 0,15^2} = 7,33 \text{ Ом}.$$

Найдем значения тока и напряженности магнитного поля для рассматриваемого случая:

$$I_3 = \frac{U_c}{R_{nn}} = \frac{220}{7,33} = 30 \text{ А}; \quad H = \frac{I_3}{\pi \cdot d_n} = \frac{30}{3,14 \cdot 0,3} = 31,8 \text{ А/см}.$$

Относительная магнитная проницаемость нихрома:  $\mu_{nn}=1$

$$z_0 = 5030 \sqrt{\frac{\rho_n}{\mu_{nn} \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 50}} = 7,2 \text{ см}.$$

Так как безразмерный параметр  $a_n = \frac{0,3}{4 \cdot 7,2} = 0,0104$  и он меньше единицы, то коэффициент поверхностного эффекта равен:

$$k_{\text{пн}} = 1 + \frac{0,0104^4}{3} = 1 + 0,3 \cdot 10^{-8}.$$

Для нихрома вследствие большой глубины проникновения электромагнитной волны  $R_{\sim} = R_{=}$ . Поэтому мощности электро-

нагревательных установок, работающих в сетях как постоянного, так и переменного тока, будут одинаковы.

**Задача 2.2.** Определить коэффициент поверхностного эффекта для проволок диаметром  $d=3$  мм из нихрома ( $\rho_n = 1,1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см,  $\mu_{rn}=1$ ) и углеродистой стали ( $\rho_{cm} = 1 \cdot 10^{-5}$  Ом·см) при частоте  $f=50$  Гц и токах нагрузки  $I_1=10$  А и  $I_2=30$  А. Принять, что температура проволок в обоих случаях остается постоянной.

### Решение

Напряженность магнитного поля на поверхности стальной проволоки может быть вычислена для тока нагрузки  $I_1$ :

$$H_1 = \frac{I_1}{\pi \cdot d} = \frac{10}{3,14 \cdot 0,3} = 10,6 \text{ А/см.}$$

Этому значению соответствует относительная магнитная проницаемость (рис. 2.1)  $\mu_{rcm1}=1300$ .

Соответственно для тока нагрузки  $I_2$  напряженность магнитного поля и магнитная проницаемость равны:

$$H_2 = \frac{I_2}{\pi \cdot d} = \frac{30}{3,14 \cdot 0,3} = 31,8 \text{ А/см, } \mu_{rcm2}=600.$$

Глубину проникновения токов для стальной проволоки определим:

– для тока нагрузки  $I_1=10$  А:

$$z_{01} = 5030 \sqrt{\frac{\rho_{cm}}{\mu_{rcm1} \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-5}}{1300 \cdot 50}} = 0,062 \text{ см;}$$

– для тока нагрузки  $I_2=30$  А:

$$z_{02} = 5030 \sqrt{\frac{\rho_{cm}}{\mu_{rcm2} \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-5}}{600 \cdot 50}} = 0,091 \text{ см.}$$

Глубину проникновения токов для нихромовой проволоки определим как

$$z_{0n} = 5030 \sqrt{\frac{\rho_n}{\mu_{rn} \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 50}} = 7,1 \text{ см.}$$

Параметр  $a$  для стальной проволоки при токах  $I_1=10$  А и  $I_2=30$  А определим по выражениям:



$$a_1 = \frac{d}{4 \cdot z_{01}} = \frac{0,3}{4 \cdot 0,062} = 1,21 \text{ и } a_2 = \frac{d}{4 \cdot z_{02}} = \frac{0,3}{4 \cdot 0,091} = 0,825.$$

Этот же параметр для проволоки из нихрома равен:

$$a_n = \frac{d}{4 \cdot z_{0n}} = \frac{0,3}{4 \cdot 7,1} = 0,0106.$$

Коэффициент поверхностного эффекта для стальной проволоки при  $I_1 = 10$  А и  $a > 1$  определим по формуле

$$k_{n1} = a + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot a} = 1,21 + 0,25 + \frac{3}{64 \cdot 1,21} = 1,5.$$

Коэффициент поверхностного эффекта для стальной проволоки при  $I_2 = 30$  А и  $a < 1$  определим по формуле

$$k_{n2} = 1 + \frac{a^4}{3} = 1 + \frac{0,825^4}{3} = 1,15.$$

Коэффициент поверхностного эффекта для проволоки из нихрома определим по формуле

$$k_{nn} = 1 + \frac{a^4}{3} = 1 + \frac{0,0106^4}{3} = 1 + 0,3 \cdot 10^{-8}.$$

Как видно, поверхностный эффект при частоте тока  $f = 50$  Гц заметно проявляется лишь у ферромагнитных проводников и тем больше, чем меньше плотность тока.

**Задача 2.3.** Определить параметры трансформатора для электроконтактного нагрева прутков из углеродистой стали (удельное электрическое сопротивление при  $20^\circ\text{C}$   $\rho_{20} = 0,135 \cdot 10^{-4}$  Ом·см; плотность стали –  $\delta = 7,8$  кг/дм<sup>3</sup>; средняя удельная теплоемкость стали  $c = 0,48$  кДж/(кг·°C)) от начальной температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t_2 = 700^\circ\text{C}$ . Длина нагреваемой части прутка  $l = 0,4$  м, диаметр  $d = 30$  мм, продолжительность включения трансформатора ПВ = 0,25; температура окружающей среды  $t_o = 20^\circ\text{C}$ ; термический КПД равен 90%.

### Решение

Масса нагреваемой части прутка:

$$m = \delta \cdot F \cdot l = \delta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = 7,8 \cdot 10 \cdot \frac{3,14 \cdot (30 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot 0,4 = 2,2 \text{ кг}.$$

Продолжительность нагрева определим по формуле

$$\tau = \frac{m_1}{\Delta P} \cdot c \cdot (t_2 - t_1) = \frac{5,5}{200} \cdot 0,48 \cdot (700 - 20) = 9 \text{ с.}$$

Недостающие данные для определения продолжительности нагрева определим как

$$m_1 = m \cdot \frac{1}{l} = 2,2 \cdot \frac{1}{0,4} = 5,5 \text{ кг/м и } \Delta P = 200 \text{ кВт/м}$$

(Романов Д. И. Электроконтактный нагрев металлов. М., 1965).

Полезная мощность, расходуемая на нагрев:

$$P_{\text{пол}} = \frac{c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = \frac{0,48 \cdot 2,2 \cdot (700 - 20)}{9} = 79,6 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность трансформатора определяем по формуле

$$S_{\text{мп}} = \frac{k_3 \cdot P_{\text{пол}}}{\eta \cdot \cos \varphi} \sqrt{ПВ} = \frac{1,2 \cdot 79,6}{0,82 \cdot 0,84} \sqrt{0,25} = 123 \cdot \sqrt{0,25} \approx 62 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Используя данные таблицы 2.1 для  $l/d^2=40/3^2=4,4$  определяем  $\eta=0,82$ ;  $\cos \varphi=0,84$ .

Сопротивление прутка определяем по формуле

$$R_{\sim} = k_n \cdot \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  вычислим по формуле

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta + \alpha^2 \cdot \theta^2),$$

для среднего за время нагрева перепада температур:

$$\theta = \frac{t_2 + t_1}{2} - t_0 = \frac{700 + 20}{2} - 20 = 340^\circ \text{C,}$$

$$\rho = 0,135 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,0055 \cdot 340 + 9,0 \cdot 10^{-6} \cdot 340^2) = 0,528 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см.}$$

Для определения коэффициента поверхностного эффекта найдем значения глубины проникновения токов  $z_0$  и параметр  $a$ . При высоких плотностях тока, наблюдающихся в нагреваемых телах из углеродистой стали, можно принять  $\mu=100$ . Глубину проникновения токов найдем по формуле

$$z_0 = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{0,528 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 50}} = 0,52 \text{ см.}$$

Определим параметр  $a$  по формуле

$$a = \frac{d}{4 \cdot z_0} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,52} = 1,37.$$

Коэффициент поверхностного эффекта равен:

$$k_n = a + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot a} = 1,37 + 0,25 + \frac{3}{64 \cdot 1,37} = 1,65.$$

Сопротивление прутка равно:

$$R_{\sim} = k_n \cdot \rho \cdot \frac{l}{F} = 1,65 \cdot 0,528 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{40 \cdot 4}{3,14 \cdot 3^2} = 0,495 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора равно:

$$U_2 = \sqrt{\frac{R_{\sim} \cdot P_{нол}}{\eta_m}} = \sqrt{\frac{0,495 \cdot 10^{-3} \cdot 79,6 \cdot 10^3}{0,9}} = 6,6 \text{ В.}$$

Рабочий ток равен:

$$I = \frac{P_{нол}}{U_2} = \frac{79,6 \cdot 10^3}{6,6} = 12100$$

Для полученного значения тока можно принять  $\Delta U = 0,1 U_2$ , тогда  $U_x = 7,3 \text{ В}$ .

По завершению расчета трансформатор для электроконтактного нагрева можно выбрать по каталожным данным.

**Задача 2.4.** Проверить детали, соединенные точечной сваркой, на отрыв по сечению в плоскости их соприкосновения с учетом расчетного диаметра точек, если известно, что площадь сечения данного соединения  $F = 100 \text{ мм}^2$ , допустимое механическое напряжение на растяжение  $\sigma_{\delta} = 60 \text{ Н/мм}^2$ , диаметр точек  $d = 8 \text{ мм}$ .

### Решение

Находим механическое напряжение отрыва,  $\text{Н/мм}^2$ :

$$\sigma_{omp} = \frac{P}{\pi} \cdot \frac{d^2}{4},$$

Давление сил отрыва,  $\text{Н}$ :

$$P = \sigma_{\delta} \cdot F.$$

Определим усилие на отрыв,  $\text{Н/мм}^2$ :

$$\sigma'_{\delta} = 0,4 \cdot \sigma_{omp}.$$

Проверяем детали на отрыв. Если  $\sigma_{omp} < 0,7 \cdot \sigma'_d$ , то отрыва деталей не будет. Если  $\sigma_{omp} > 0,7 \cdot \sigma'_d$ , то отрыв деталей будет.

Определим все необходимые для заключения компоненты:

$$\sigma_{omp} = \frac{P}{\pi} \cdot \frac{d^2}{4} = \frac{\sigma_d \cdot F}{\pi} \cdot \frac{d^2}{4} = \frac{60 \cdot 100}{3,14} \cdot \frac{8^2}{4} = 118,5 \text{ Н/мм}^2,$$

$$\sigma'_d = 0,4 \cdot \sigma_{omp} = 0,4 \cdot 118,5 = 47,4 \text{ Н/мм}^2.$$

Так как  $\sigma_{omp} = 118,5 \text{ Н/мм}^2$ , а  $0,7 \cdot \sigma'_d = 33,18 \text{ Н/мм}^2$ , то имеет место отрыв деталей.

**Задача 2.5.** Определить силу сварочного тока при точечной контактной сварке листов углеродистой стали толщиной 0,5 мм каждый. Время сварки  $\tau = 0,2$  с, количество выделяемой теплоты  $Q = 100$  Дж, а сопротивление  $R = 54$  мкОм.

### Решение

Силу сварочного тока определим используя закон Джоуля-Ленца, в соответствии с которым:

$$I_{св} = \sqrt{\frac{Q}{R \cdot t}} = \sqrt{\frac{100}{0,054 \cdot 0,2}} = 96 \text{ А}.$$

### Контрольные задания

1. Определить коэффициент поверхностного эффекта для проволок диаметром  $d = 2,5$  мм из нихрома ( $\rho_n = 1,1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см,  $\mu_n = 1$ ) и углеродистой стали ( $\rho_{ст} = 1 \cdot 10^{-5}$  Ом·см) при частоте  $f = 50$  и  $60$  Гц и токах нагрузки  $I_1 = 5$  А и  $I_2 = 15$  А. Принять, что температура проволок в обоих случаях остается постоянной.

2. Определить параметры трансформатора для электроконтактного нагрева прутков из углеродистой стали (удельное электрическое сопротивление при  $20^\circ\text{C}$   $\rho_{20} = 0,135 \cdot 10^{-4}$  Ом·см; плотность стали  $\delta = 7,8$  кг/дм<sup>3</sup>; средняя удельная теплоемкость стали  $c = 0,48$  кДж/(кг·°C)) от начальной температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t_2 = 750^\circ\text{C}$ . Длина нагреваемой части прутка  $l = 1,0$  м, диаметр  $d = 25$  мм, продолжительность включения трансформатора ПВ = 0,25; температура окружающей среды  $t_o = 20^\circ\text{C}$ ; термический КПД равен 90%.

3. Установка прямого нагрева металлических тел представляет собой нагревательный трансформатор с контактным устройством, в котором закрепляется деталь с площадью поперечного сечения  $F = 40 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>, длиной  $l = 1$  м, удельное сопротивление материала детали  $\rho_{20} = 0,11 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,95$ , коэффициент

поверхностного эффекта  $k_n=1,2$ . Время нагрева детали до заданной температуры  $\tau = 5$  с. Определить потребляемую мощность нагревательного трансформатора и напряжение его вторичной обмотки. Плотность материала детали  $\delta = 7,8$  т/м<sup>3</sup> и удельная массовая теплоемкость  $c = 490$  Дж/(кг·°С). Конечная температура нагрева  $t_2 = 1000^\circ\text{C}$  и начальная  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,004\dots 0,007$  1/°С.

4. Как изменится величина тока в нагреваемой детали при нагреве ее от температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2 = 550^\circ\text{C}$ ? Известен температурный коэффициент материала детали  $\alpha = 0,006$  1/°С, деталь тонкостенная, то есть глубина проникновения тока в материал много больше толщины стенки  $z_0 \gg \Delta$ , коэффициент мощности в процессе нагрева не изменяется. Внешняя характеристика нагревательного трансформатора абсолютно жесткая. Ток в момент включения  $I_1 = 10$  А; напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2 = 20$  В; относительная магнитная проницаемость материала  $\mu = 1$ .

5. К нагревательному трансформатору подключена стальная труба с внутренним диаметром  $d_e = 0,05$  м и толщиной стенки  $\Delta = 5$  мм. Начальная температура трубы  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , а в конце нагрева  $t_2 = 800^\circ\text{C}$ . Температура Кюри (изменение магнитных свойств стали) для материала трубы составляет  $750^\circ\text{C}$ .

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,005$  1/°С. Относительная магнитная проницаемость  $\mu = 250$ . Длина трубы  $l = 1$  м. Известно напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2 = 12,5$  В. Рассчитать зависимость тока в детали  $I_2$  от температуры детали (2-3 точки до температуры Кюри и 2-3 точки после нее). Определить среднюю мощность нагрева и время нагрева трубы до заданной температуры.

6. Определить удельную мощность при контактной сварке изделий из конструкционной стали, если известно, что сила сварочного тока  $I = 400$  А, плотность тока в данном случае  $j = 8$  А/мм<sup>2</sup>, напряжение во вторичной обмотке  $U = 31,25$  В.

7. В процессе сварки было выделено  $14700000$  Дж тепловой энергии. За промежуток времени в 1 с, сопротивление между деталями было равно  $20$  Ом, сопротивление детали также было  $20$  Ом. Определить ток, при котором осуществлялся процесс сварки.

8. Определить силу сварочного тока  $I_{св}$ , силу сжатия изделий  $p_{сж}$ , если толщина свариваемых деталей  $\Delta = 8$  мм, плотность тока  $j = 250$  А/мм<sup>2</sup>, площадь контактной поверхности электрода  $F_э = 50$  мм<sup>2</sup>.

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
2. Как изменяется удельное сопротивление металлических проводников при нагреве?
3. Что такое температурный коэффициент сопротивления и каковы единицы его измерения?
4. Поясните природу поверхностного эффекта и его влияние на величину сопротивления металлического проводника. Что такое коэффициент поверхностного эффекта?
5. Как изменяется магнитная проницаемость в зависимости от напряженности магнитного поля и температуры? Что такое точка Кюри?
6. Как определить глубину проникновения электромагнитной волны в нагреваемый материал?
7. Как определить термический КПД процесса электроконтактного нагрева для деталей, имеющих одинаковое сечение по длине?
8. Какие параметры источника питания нагревательных устройств электроконтактного нагрева определяют и с использованием каких зависимостей?
9. Какие значения плотности тока характеризуют сварку малоуглеродистой стали на «мягком» и на «жестком» режимах.
10. Как определить усилие сжатия  $p_{сж}$ , продолжительность этапов сжатия  $t_{сж}$ , сварки  $t_{св}$  и проковки  $t_n$  для процесса точечной сварки?

## **3. Электрический нагрев проводников второго рода. Электродный нагрев**

### **3.1. Общие сведения из теории электропроводности проводников второго рода**

Электродный нагрев используется для нагрева проводников второго рода, электропроводность которых обусловлена наличием свободных зарядов – ионов. К проводникам второго рода относятся вода и различные водные растворы, молоко, сочные корма, почва, бетон и т.п.

Если к такому проводнику при помощи электродов приложить напряжение, то в этом случае происходит прямой электрический нагрев – сам материал или среда являются элементом цепи, в которой электрическая энергия непосредственно преобразуется в тепловую. Электродный нагрев является наиболее простым и экономичным способом нагрева материалов, не требующим ни понижающих трансформаторов, ни специальных нагревателей из дорогостоящих сплавов. Электроды выполняют лишь функцию подвода напряжения к нагреваемой среде, а сами при протекании по ним тока практически не нагреваются. Электроды изготавливают из недефицитных материалов, чаще всего из металлов, но могут быть и неметаллические (графитовые, угольные). Во избежание электролиза для электродного нагрева используется только переменный ток.

Так как электропроводность подавляющего большинства сельскохозяйственного сырья, продуктов и кормов обусловлена содержанием в них воды, а сам электродный нагрев наиболее широко применяется в водогрейных и паровых котлах, то необходимо более детально рассмотреть такую характеристику воды как электропроводность.

Электропроводность дистиллированной воды  $\sigma$  очень низка и составляет  $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ , для сравнения у меди это значение равно  $0,6 \cdot 10^6 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ .

Проводимость водой электрического тока обусловлена наличием в ней растворённых солей, кислот и щелочей, молекулы

которых в воде диссоциируют на ионы. Дождевая вода содержит растворенных солей не более 50 мг/л, воды рек – 500-600 мг/л, подземные воды – от 100 мг/л до нескольких граммов на литр.

С возрастанием температуры увеличивается степень диссоциации молекул на ионы и растет их подвижность, вследствие чего проводимость воды повышается. Это ведёт к увеличению мощности в процессе нагрева, что является существенным недостатком, так как приводит к завышению сечения питающих проводов и усложняет расчёт установок.

Электропроводность воды в зависимости от температуры изменяется по следующему выражению:

$$\sigma_t = \sigma_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ\text{C})), \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{20}$  – удельная электропроводность воды при  $20^\circ\text{C}$ , ( $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ );  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, равный  $0,025\dots 0,035$   $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура воды,  $^\circ\text{C}$ .

При расчётах более удобнее пользоваться удельным электрическим сопротивлением  $\rho_t$ , ( $\text{Ом}\cdot\text{см}$ ) воды, которое обратно пропорционально ее удельной электропроводности:

$$\rho_t = \frac{1}{\sigma_t} = \frac{1}{\sigma_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ\text{C}))} = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ\text{C})}. \quad (3.2)$$

На практике коэффициент  $\alpha$  принимают равным  $0,025$  и после ряда преобразований выражение для нахождения удельного электрического сопротивления воды в зависимости от температуры принимает вид:

$$\rho_t = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20^\circ\text{C} + t}. \quad (3.3)$$

В диапазоне температур от  $20$  до  $100^\circ\text{C}$  удельное электрическое сопротивление воды возрастает в 3-5 раз, во столько же раз изменяется мощность, потребляемая из сети. Это один из существенных недостатков электродного нагрева, приводящий к завышению сечения питающих проводов и усложняющий расчет установок электродного нагрева.

При наступлении заметного парообразования, вследствие насыщения воды пузырьками пара, который не является проводником тока, удельное электрическое сопротивление воды возрастает и в расчётах это обстоятельство учитывается коэффициентом  $\beta$ , зависящим от давления и плотности тока на электродах:



$$\rho_{см} = \rho_{кип} \cdot \beta = \rho_{кип} \cdot \chi \cdot e^{jk}, \quad (3.4)$$

где  $\rho_{см}$  – удельное электрическое сопротивление смеси «вода-пар», Ом·м;  $\rho_{кип}$  – удельное электрическое сопротивление воды без заметного парообразования, Ом·м;  $\chi$  – постоянная, равная для воды 0,925;  $k$  – коэффициент, зависящий от давления в котле, для сельскохозяйственных парообразователей  $k=1,5$ ;  $j$  – плотность тока на электродах, А/мм<sup>2</sup>.

При нормальном давлении парообразование оказывает влияние на изменение удельного электрического сопротивления при температуре выше 75°C. Для паровых котлов коэффициент  $\beta$  достигает значения 1,5.

При расчёте электродных нагревателей необходимо учитывать допустимую плотность тока  $j_{дон}$ , так как в случае превышения некоторого значения плотности тока и неправильном выборе материала электродов в результате электролиза может образоваться гремучий газ (смесь кислорода и водорода), который может вывести установку из работы и нарушить ход протекания технологического процесса.

Кроме того, допустимая напряжённость электрического поля не должна превышать пробивной прочности нагреваемой среды (воды). Методика выбора допустимой напряжённости поля и плотности тока представлена ниже.

## **3.2. Расчет электродных водонагревателей и парообразователей**

Получение горячей воды и пара – наиболее распространенный вариант применения электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве, особенно в животноводстве. Не загрязняя воздуха и самого помещения продуктами и отходами сгорания, электронагрев в наибольшей степени отвечает зоотехническим и санитарно-гигиеническим требованиям. Кроме этого это еще и наиболее экономичный способ получения горячей воды и пара, не требующий затрат на транспортировку топлива, строительство и эксплуатацию котельных.

Промышленность выпускает разнообразное электротермическое оборудование для нагрева воды и получения пара, которое в условиях эксплуатации постоянно готово к действию, требует минимальных затрат на обслуживание.

Электрические водонагреватели и электродкотлы классифицируются по способу нагрева, принципу нагрева (прямой, косвенный), принципу действия (периодического, непрерывного), рабочей температуре, давлению, напряжению питания.

Электрические водонагреватели работают обычно под атмосферным давлением и предназначены для получения горячей воды с температурой до 95°C. Водогрейные электродкотлы работают под избыточным давлением (до 0,6 МПа) и позволяют получать воду с температурой выше 100°C, а паровые котлы производят насыщенный пар давлением до 0,6 МПа.

Электродные водонагреватели работают по принципу прямого нагрева: вода нагревается протекающим по ней электрическим током, подводимым при помощи электродов, которые по сравнению с трубчатыми электронагревателями (ТЭНами) более просты, дешевы и долговечны.

Водогрейные и паровые электродкотлы конструктивно выпускаются электродными. Электродный нагрев обеспечивает котлам простоту конструкции и регулирования мощности, высокую надежность и срок службы, высокие энергетические показатели. Котлы выпускаются на низкое (0,4 кВ) и высокое (6-10 кВ) напряжения с линейкой мощностей от 25 до 10 000 кВт.

Расчёт электродных нагревателей заключается в определении геометрических размеров электродов конкретной конфигурации, обеспечивающих нагрев технологически необходимого количества воды до заданной температуры за определённое время.

#### **Методика расчёта электродных нагревателей.**

1) В соответствии с исходными технологическими условиями задаются следующие параметры: масса воды, подлежащая нагреву или производительность установки, время нагрева, начальная и конечная температура воды, а также удельное сопротивление воды.

2) Вначале определяется средняя мощность для каждого типа электронагревательного устройства:

*а) непроточный водонагреватель:*

$$P_{cp} = \frac{c \cdot m \cdot (t_k - t_n)}{3600 \cdot \tau \cdot \eta}, \quad (3.5)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость воды,  $c = 4,19$  кДж/(кг·°C);  $m$  – масса нагреваемой воды, кг;  $t_k$  и  $t_n$  – конечное и начальное значение температу-

ры воды, °С;  $\tau$  – время нагрева, ч;  $\eta$  – КПД непроточного нагревателя,  $\eta=0,92\dots0,95$ ;

б) *проточный водонагреватель*:

$$P_{cp} = \frac{c \cdot L \cdot (t_k - t_n)}{3600 \cdot \eta}, \quad (3.6)$$

где  $L$  – производительность водонагревателя, кг/ч;  $\eta$  – КПД проточного водонагревателя,  $\eta=0,95\dots0,98$ ;

в) *парообразователь*:

$$P_{cp} = \frac{m \cdot [c \cdot (t_k - t_n) + a]}{3600 \cdot \tau \cdot \eta} = \frac{L \cdot [c \cdot (t_k - t_n) + a]}{3600 \cdot \eta}, \quad (3.7)$$

где  $a$  – скрытая теплота фазового преобразования воды (количество теплоты, необходимое для испарения 1 кг воды),  $a=2255$  кДж/кг.

3) Для всех типов водонагревателей определяется удельное электрическое сопротивление воды при конечной температуре нагрева:

$$\rho_k = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t_k + 20^\circ C}, \quad (3.8)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление воды при 20°С, Ом·см.

4) В зависимости от типа электронагревательного устройства далее выполняются следующие расчёты.

а) *Непроточный водонагреватель*. Так как с ростом температуры уменьшается удельное электрическое сопротивление воды, то необходимо определить мощность в конце нагрева  $P_k$ . Мощность в начале и в конце нагрева  $P_n$  и  $P_k$  соотносятся обратно удельному электрическому сопротивлению воды  $\rho_k$  и  $\rho_n$ :

$$\frac{P_k}{P_n} = \frac{\rho_n}{\rho_k}, \quad (3.9)$$

откуда

$$P_k = \frac{\rho_n \cdot P_n}{\rho_k}. \quad (3.10)$$

Так как

$$\rho_k = \rho_n \frac{t_n + 20^\circ C}{t_k + 20^\circ C}, \quad (3.11)$$

то

$$P_{\kappa} = \frac{P_n}{\frac{t_n + 20^{\circ}C}{t_{\kappa} + 20^{\circ}C}}. \quad (3.12)$$

Поскольку

$$P_{cp} = \frac{P_{\kappa} + P_n}{2}, \quad (3.13)$$

то

$$P_n = 2P_{cp} - P_{\kappa}. \quad (3.14)$$

Отсюда получим формулу для определения  $P_{\kappa}$  и  $P_n$ :

$$P_{\kappa} = \frac{2P_{cp}}{1 + \frac{t_n + 20^{\circ}C}{t_{\kappa} + 20^{\circ}C}}, \quad (3.15)$$

аналогично

$$P_n = \frac{2P_{cp}}{1 + \frac{t_{\kappa} + 20^{\circ}C}{t_n + 20^{\circ}C}}. \quad (3.16)$$

б) *Проточный водонагреватель.* В связи с тем, что в разных зонах электрического поля вода имеет различные значения температуры, а следовательно, и удельного электрического сопротивления, то необходимо определить среднее удельное электрическое сопротивление воды:

$$\rho_{cp} = \frac{\int_{t_n}^{t_{\kappa}} \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t + 20} dt}{t_{\kappa} - t_n} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t_{\kappa} - t_n} \ln \frac{20 + t_{\kappa}}{20 + t_n}. \quad (3.17)$$

в) *Парообразователь.* Вследствие насыщения кипящей воды пузырьками пара удельное электрическое сопротивление воды увеличивается поэтому с учётом коэффициента  $\beta$  определяется удельное электрическое сопротивление пароводяной смеси  $\rho_{см}$ :

$$\rho_{см} = \rho_{кин} \cdot \beta = \rho_{кин} \cdot 0,925e^{jk}. \quad (3.18)$$

5) Для всех типов нагревателей в зависимости от значения удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  определяется минимально допустимое расстояние между электродами  $l_{\min}$ :

$$l_{\min} = \frac{U_c}{E_{\text{доп}}}, \quad (3.19)$$

где  $U_c$  – напряжение сети между электродами, которое определяется в зависимости от схемы расположения электродов (эквивалентной схемы замещения), В;  $E_{\text{доп}}$  – допустимое значение напряжённости электрического поля, выбирается в зависимости от значения  $\rho_k$ , например, по таблице 3.1, В/см.

Таблица 3.1

**Зависимость допустимой напряжённости электрического поля и плотности тока от удельного сопротивления воды**

Показатели	Удельное сопротивление воды, Ом·см							
	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Допустимая напряжённость электрического поля, В/см	400	500	610	820	950	1030	1120	1150
Допустимая плотность тока, А/см <sup>2</sup>	0,5	0,49	0,47	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22

Фактическое расстояние между электродами должно быть  $l \geq l_{\min}$ .

Часто при расчетах принимают, что при сетевом напряжении  $U = 380$  В –  $l = 3 \cdot l_{\min}$ , а при  $U = 10$  кВ –  $l \approx l_{\min}$ .

б) Зная фазное сопротивление  $R_\phi$ , определяется расчётная площадь электродов (электрического поля)  $F$  с учетом максимальной мощности  $P_{\max}$  и следующего выражения:

$$R_\phi = \rho \cdot \frac{l}{F} \quad (3.20)$$

и

$$P_{\max} = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{R_\phi}, \quad (3.21)$$

откуда

$$F = \frac{P_{\max} \cdot \rho \cdot l}{3 \cdot U_\phi^2}, \quad (3.22)$$

Значения максимальной мощности  $P_{max}$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$  для расчета по формуле (3.22) следует принимать:

– для непроточных водонагревателей:

$$P_{max}=P_{к}; \rho=\rho_{к}; \quad (3.23)$$

– для проточных водонагревателей:

$$P_{max}=P_{ср}; \rho=\rho_{ср}; \quad (3.24)$$

– для парообразователей:

$$P_{max}=P_{ср}; \rho=\rho_{см}. \quad (3.25)$$

7) В завершении расчетов выполняют проверку на допустимую плотность тока по условию

$$j_{расч} = \frac{I_{\phi}}{F} \leq j_{дон}. \quad (3.25)$$

Если данное условие не выполняется, то необходимо увеличить межэлектродное расстояние  $l$ .

Размеры электродов определяются по рассчитанной площади электрического поля  $F$ , с учётом схемы расположения электродов.

Регулирование мощности в электродных водонагревателях и котлах осуществляется, как правило, изменением площади электрического поля путем частичного или полного экранирования электродов, с помощью экранирующих цилиндров, пластин, дуг различной формы.

### Примеры решения задач

**Задача 3.1.** В батарею водяного отопления вода поступает при  $t_1 = 80^\circ\text{C}$  по трубе площадью поперечного сечения  $F = 500 \text{ мм}^2$  со скоростью  $v = 1,2 \text{ см/с}$ , а выходит из батареи, имея температуру  $t_2 = 25^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты получает отапливаемое помещение за сутки (время  $\tau$ )?

#### Решение

Если вода поступает в батарею при температуре  $t_1$ , а выходит из батареи при температуре  $t_2$ , то очевидно, что искомое количество теплоты можно найти по формуле

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2),$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $c=4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $m$  – масса воды, которая проходит через батарею за сутки, то есть за время  $\tau$ ,  $\text{кг}$ .

Массу воды  $m$ , которая проходит через батарею за сутки, можно определить по выражению

$$m = \delta \cdot V,$$

где  $\delta$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\delta = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $V$  – объем воды через батарею,  $\text{м}^3$ .

Объем  $V$  равен объему трубы, который заняла бы вода при передвижении в ней со скоростью  $v$ :

$$V = F \cdot l = F \cdot v \cdot \tau,$$

где  $l$  – расстояние пройденное водой в трубе за время  $\tau$ , м.

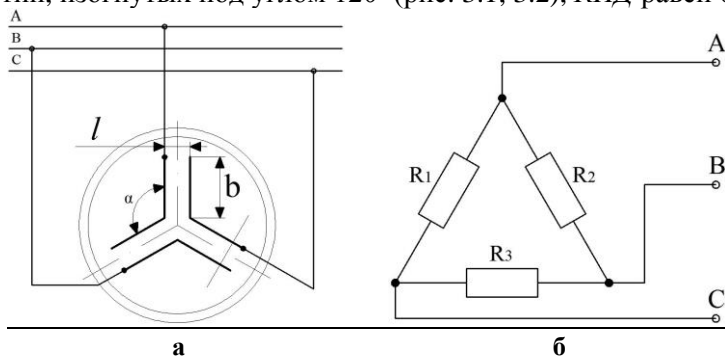
С учётом вышенаписанных выражений, формула для расчета искомого количества теплоты примет следующий вид:

$$Q = c \cdot \delta \cdot v \cdot \tau \cdot (t_1 - t_2).$$

Количество теплоты, получаемое отапливаемым помещением за сутки, равно:

$$\begin{aligned} Q &= 4200 \cdot 1000 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,012 \cdot 86400 \cdot (80 - 25) = \\ &= 119,75 \cdot 10^6 \text{ Дж} \approx 120 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

**Задача 3.2.** Рассчитайте для нужд животноводческой фермы непроточный электродный водонагреватель емкостью 400 л, используемый для нагрева воды в течении четырех часов от  $t_n = 5^\circ\text{C}$  до  $t_k = 95^\circ\text{C}$ , который подключен к трехфазной сети с напряжением 380 В. Удельное сопротивление воды  $\rho_{20} = 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Электродное устройство состоит из трех электродов, выполненных в виде пластин, изогнутых под углом  $120^\circ$  (рис. 3.1, 3.2), КПД равен 0,94.



**Рис. 3.1.** Схема расположения электродов (а) и схема их замещения (б)

### Решение

Средняя мощность нагрева равна:

$$P_{cp} = \frac{c \cdot m \cdot (t_k - t_n)}{\eta \cdot \tau \cdot 3600} = \frac{4,19 \cdot 400 \cdot (95 - 5)}{0,94 \cdot 4 \cdot 3600} = 11,1 \text{ кВт.}$$

Мощности в конце и начале нагрева определяем по формулам:

$$P_k = \frac{2 \cdot P_{cp}}{1 + \left( \frac{20^\circ C + t_n}{20^\circ C + t_k} \right)} = \frac{2 \cdot 11,1}{1 + \frac{20 + 5}{20 + 95}} = 18,2 \text{ кВт;}$$

$$P_n = \frac{2 \cdot P_{cp}}{1 + \left( \frac{20^\circ C + t_k}{20^\circ C + t_n} \right)} = \frac{22,3}{1 + \frac{20 + 95}{20 + 5}} = 5,06 \text{ кВт.}$$

Удельное электрическое сопротивление воды в конце нагрева равно:

$$\rho_k = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t_k + 20^\circ C} = \frac{40 \cdot 2000}{95 + 20} = 695 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

По таблице 3.1 для значения  $\rho_k = 695 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  выбираем допустимую напряженность электрического поля  $E_{дон} = 530 \text{ В/см}$ .

Расстояние между электродами будет равно:

$$l_{\min} = \frac{U}{E_{дон}} = \frac{380}{530} = 0,72 \text{ см.}$$

Для удобства практической реализации расстояние  $l$  принимаем равным 1 см.

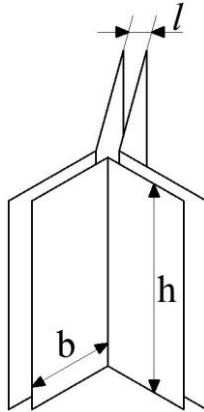


Рис. 3.2. Форма электродов



Площадь электродов определяем согласно рисунку 3.2:

$$F = \frac{P_{\max} \cdot \rho_{\kappa} \cdot l}{3 \cdot U_{\phi}^2} = \frac{18,2 \cdot 10^3 \cdot 695 \cdot 1}{3 \cdot 380^2} = 29 \text{ см}^2.$$

Выполняем проверку по допустимой плотности тока. Рабочий фазный ток равен:

$$I_{\phi} = \frac{P_k}{3 \cdot U_{\phi}} = \frac{18200}{3 \cdot 380} = 15,96 \text{ А.}$$

Плотность рабочего тока:  $j = 15,96/29 = 0,56 \text{ А/см}^2$ , что слишком много, так как при  $\rho_{\kappa} = 695 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  значение допустимой плотности тока равно  $j_{\text{дон}} = 0,48 \text{ А/см}^2$  (табл. 3.1), поэтому увеличим расстояние между электродами. Примем, как рекомендуется для такого рода расчетов, что  $l = 3 \cdot l_{\min} = 3 \cdot 0,72 = 2,16 \approx 2 \text{ см}$ . Тогда площадь электродов будет равна:  $F = 58 \text{ см}^2$ , а фактическая плотность тока –  $j = 15,96/58 = 0,275 \text{ А/см}^2$ , что допустимо.

Определяем геометрические размеры электродов. Принимаем  $h = 2b$ , тогда  $F = h \cdot b = 2b^2$ , откуда  $b = \sqrt{\frac{58}{2}} = 5,38 \text{ см}$ . Принимаем значение  $b$  равным  $5,5 \text{ см}$ , поэтому  $h = 11 \text{ см}$ .

**Задача 3.3.** Рассчитать электродную систему и определить геометрические размеры электродов (рис. 3.1) проточного водонагревателя производительностью  $L = 120 \text{ л/ч}$  для нагрева воды на технологические нужды.

Температура на входе в электроводонагреватель  $t_1 = 5^{\circ}\text{C}$ , а на выходе из него  $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление воды при  $20^{\circ}\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Водонагреватель подключается к трехфазной сети переменного тока с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 380\text{В}$ ,  $\text{КПД} = 0,98$ .

### Решение

Средняя мощность нагрева равна:

$$P_{\text{cp}} = \frac{c \cdot L \cdot (t_2 - t_1)}{3600 \cdot \eta} = \frac{4,19 \cdot 120 \cdot (80 - 5)}{3600 \cdot 0,98} = 10,47 \text{ кВт.}$$

Среднее удельное электрическое сопротивление и его значение на выходе воды с электродов определяем по формулам:

$$\rho_{\text{cp}} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{20^{\circ}\text{C} + t_2}{20^{\circ}\text{C} + t_1} = \frac{40 \cdot 2000}{75} \ln \frac{20 + 80}{20 + 5} = 1610 \text{ Ом}\cdot\text{см},$$

$$\rho_k = \frac{40 \cdot 2000}{20 + 80} = 800 \text{ Ом}\cdot\text{см.}$$

По значению  $\rho_k$  определяем допустимую напряженность электрического поля (табл. 3.1), она равна  $E_{дон} = 555 \text{ В/см}$ .

Минимально допустимое расстояние между электродами равно:

$$l_{\min} = \frac{U}{E_{дон}} = \frac{380}{555} = 0,68 \text{ см.}$$

Площадь электродов будет равна:

$$F = \frac{P_{cp} \cdot \rho_{cp} \cdot l}{3 \cdot U_l^2} = \frac{10,47 \cdot 10^3 \cdot 1610 \cdot 0,68}{3 \cdot 380^2} = 26,46 \text{ см}^2.$$

Проводим проверку на допустимую плотность тока. Фактическая плотность тока равна:

$$j_{факт} = \frac{P_{cp}}{3 \cdot U_l \cdot F} = \frac{10,47 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 26,46} = 0,347 \text{ А/см}^2.$$

Полученное значение фактической плотности тока меньше допустимого, что позволяет рассчитать геометрические размеры электродов.

Определяем геометрические размеры электродов:

$$h = 2b; F = h \cdot b = b^2.$$

Откуда  $b = \sqrt{\frac{32,5}{2}} = 3,63 \text{ см}$ , принимаем значение  $b = 3,5 \text{ см}$ , тогда  $h = 7 \text{ см}$ .

Делаем проверку по допустимой плотности тока. Определяем расчетную площадь электродов:  $F = h \cdot b = 24,5 \text{ см}^2$  и находим фактическое значение плотности тока:

$$j_{факт} = \frac{P_{cp}}{3 \cdot U_l \cdot F} = \frac{10,47 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 24,5} = 0,375 \text{ А/см}^2,$$

которое меньше допустимого значения ( $j_{дон} = 0,48 \text{ А/см}^2$ ). Расчет выполнен верно.

**Задача 3.4.** Рассчитать электродную систему проточного трехфазного водонагревателя, который должен быть установлен в системе обогрева помещения и развивать мощность  $P = 25 \text{ кВт}$ . Температура на входе в электроводонагреватель  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ , а на выходе из него –  $t_2 = 95^\circ\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление

воды при  $20^{\circ}\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Водонагреватель подключается к трехфазной сети переменного тока с напряжением 380 В. Система электродов – плоская пластинчатая (табл. П. 7, схема 5), ширина пластин  $b = 20 \text{ см}$ , КПД = 0,98. Определить межэлектродное расстояние  $l$  и высоту пластин  $h$ , фактическую напряженность электрического поля между электродами  $E_{\text{факт}}$  и фактическую плотность тока на электродах  $j_{\text{факт}}$ .

### Решение

Так как мощность водонагревателя больше 10 кВт, то водонагреватель должен быть трехфазным. Мощность одной фазы:

$$P_{\phi} = \frac{U_{3\phi}}{3} = \frac{25}{3} = 8,33 \text{ кВт.}$$

Для указанной системы плоских пластинчатых электродов напряжение между электродами в одной фазе равно:  $U_{\phi} = U = 380 \text{ В}$ .

Необходимое электрическое сопротивление воды в одной фазе водонагревателя равно:

$$R = \frac{U_{\phi}^2}{P_{\phi}} = \frac{380^2}{8330} = 17,3 \text{ Ом.}$$

Среднее (по высоте электродов) удельное электрическое сопротивление воды в водонагревателе:

$$\rho_{cp} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20^{\circ}\text{C} + t_{cp}} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20^{\circ}\text{C} + \frac{t_1 + t_2}{2}} = \frac{40 \cdot 30}{20 + 82,5} = 11,5 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Удельное электрическое сопротивление воды на выходе из водонагревателя:

$$\rho_{t_2} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20^{\circ}\text{C} + t_2} = \frac{40 \cdot 30}{20 + 95} = 10,4 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

По значению  $\rho_{t_2} = 10,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  определяем допустимую напряженность электрического поля (табл. 3.1), она равна  $E_{\text{доп}} = 51 \cdot 10^3 \text{ В/м}$ .

Минимальное допустимое расстояние между электродами:

$$l_{\text{min}} = \frac{U_{\phi}}{E_{\text{доп}}} = \frac{380}{51000} = 0,00745 \text{ м.}$$

Примем, как рекомендуется для такого рода расчетов, что фактическое расстояние равно:

$$l = 3 \cdot l_{\min} = 3 \cdot 0,00745 = 0,0224 \text{ м} \approx 2,24 \text{ см.}$$

Коэффициент геометрической формы электродов:

$$k_{э} = \frac{l}{b} = \frac{0,0224}{0,2} = 0,112.$$

Определяем высоту электродов:

$$h = \frac{\rho_{ср} \cdot k_{э}}{R} = \frac{11,7 \cdot 0,112}{17,3} = 0,0757 \text{ м} = 7,5 \text{ см.}$$

Фактическая напряженность электрического поля в межэлектродных промежутках равна:

$$E_{\text{факт}} = \frac{U_{\phi}}{l} = \frac{380}{0,0224} = 16964 \text{ В/м,}$$

то есть

$$E_{\text{факт}} = 16964 \text{ В/м} < E_{\text{дон}} = 51000 \text{ В/м.}$$

Наибольшая фактическая плотность тока у поверхности электродов:

$$j_{\text{факт}} = \frac{E_{\text{факт}}}{\rho_{t_2}} = \frac{16964}{10,4} = 1631 \text{ А/м}^2 = 0,163 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

Выполняется и второе условие:

$$j_{\text{факт}} = 0,163 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2 < j_{\text{дон}} = 0,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

Поэтому расчет электродной системы можно считать законченным.

**Задача 3.5.** Рассчитать проточный трехфазный водонагреватель, который должен удовлетворить потребителей в горячей воде. Потребная производительность  $L = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  при температуре  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ . Температура поступающей из водопровода воды –  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление воды при  $20^\circ\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Водонагреватель подключается к трехфазной сети переменного тока с напряжением 380 В. Система электродов представляет собой систему со стержневыми электродами (табл. П. 7, схема 2). Корпус цилиндрический, изготовленный из трубы диаметром  $d_k = 2r_k = 120 \text{ мм}$ . Радиус стержневых электродов принимаем из условия  $r_s = 0,21r_k \approx 12 \text{ мм}$ . Стержни располагаются в вершинах равностороннего треугольника на расстоянии от оси цилиндра  $l = 30 \text{ мм}$  (из условия  $l = 0,51r_k$ ),  $KПД = 97\%$ .

## Решение

Потребная мощность водонагревателя:

$$P = \frac{c \cdot L \cdot (t_2 - t_1)}{3600 \cdot \eta} = \frac{4,19 \cdot 0,5 \cdot 10^3 \cdot (80 - 10)}{3600 \cdot 0,97} = 42 \text{ кВт.}$$

Геометрический коэффициент электродной системы:

$$k_{эз} = \frac{1}{4\pi} \cdot \ln \left[ \frac{3r^2 \cdot (r_k^2 - r^2)^3}{r_3^2 \cdot (r_k^6 - r^6)} \right] = \frac{1}{4 \cdot 3,14} \cdot \ln \left[ \frac{3 \cdot 3^2 \cdot (6^2 - 3^2)^3}{1,2^2 \cdot (6^6 - 3^6)} \right] = 0,166.$$

Длина (высота) активной части стержней-электродов определяется по формуле

$$h = \frac{40 \cdot L_1 \cdot c \cdot k_{эз} \cdot \rho_{20}}{U^2 \cdot \eta_m} \cdot \ln \left[ \frac{20^\circ\text{C} + t_2}{20^\circ\text{C} + t_1} \right] =$$

$$= \frac{40 \cdot 0,046 \cdot 4190 \cdot 0,166 \cdot 2000}{380^2 \cdot 0,97} \cdot \ln \left[ \frac{20 + 80}{20 + 10} \right] = 22,2 \text{ см,}$$

где  $L_1 = \frac{L}{3 \cdot 3600} = \frac{0,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 3600} = 0,046 \text{ кг/с}$  – производительность водонагревателя на одну фазу.

Принимаем высоту активной части стержней-электродов  $h = 23 \text{ см}$ .

Проверим параметры электродной системы по допустимой плотности тока:

$$j_{\max} = \frac{k_n \cdot U}{2\pi \cdot r_3 \cdot k_{эз} \cdot \rho_t} = \frac{k_n \cdot U}{2\pi \cdot r_3 \cdot k_{эз} \cdot \rho_{20} \cdot \frac{40}{20^\circ\text{C} + t_2}} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 380}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 0,166 \cdot 2000 \cdot \frac{40}{20 + t_2}} = 0,446 \text{ А/см}^2.$$

Условие  $j_{\max} \leq j_{\text{дон}}$  выполняется.

Мощность водонагревателя, вычисленная по параметрам электродной системы для всех трех фаз равна:

$$P = \frac{3 \cdot U^2 \cdot h \cdot (t_2 - t_1) \cdot \eta_m}{40 \cdot k_{эз} \cdot \rho_{20} \cdot \ln \left[ \frac{20^\circ\text{C} + t_2}{20^\circ\text{C} + t_1} \right]} = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot 23 \cdot (80 - 10) \cdot 0,97}{40 \cdot 0,166 \cdot 2000 \cdot \ln \left[ \frac{20 + 80}{20 + 10} \right]} = 41055 \text{ Вт.}$$

Мощность, рассчитанная по параметрам электродной системы практически совпадает с мощностью, вычисленной по технологическим условиям.

**Задача 3.6.** Электродная система водонагревателя емкостью  $V = 100$  л с тремя экранированными коаксиальными электродами имеет следующие размеры: диаметр наружного электрода  $d_n = 5,4$  см, внутреннего –  $d_{вн} = 2,0$  см, высота электродов  $h = 20$  см, начальная температура воды  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , КПД водонагревателя – 90%, питающее напряжение  $U_n = 380/220$  В. Удельное сопротивление воды  $\rho_{20} = 1000$  Ом·см, удельная теплоемкость воды  $c = 4190$  Дж/кг. Определить мощность водонагревателя и температуру воды через  $\tau = 30$  мин после включения.

### Решение

Геометрический коэффициент электродной системы:

$$k_{эз} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left[ \frac{d_n}{d_{вн}} \right] = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \ln \left[ \frac{5,4}{2,0} \right] = 0,157.$$

Сопротивление фазы нагревателя:

$$R_\phi = \frac{k_{эз} \cdot \rho_{20}}{h} = \frac{0,157 \cdot 1000}{20} = 7,85 \text{ Ом}.$$

Мощность водонагревателя:

$$P = \frac{3U_\phi^2}{R_\phi} = \frac{3 \cdot 220^2}{7,85} = 184968 \text{ Вт} \approx 18,5 \text{ кВт}.$$

Постоянная времени нагрева:

$$T = \frac{40 \cdot m \cdot c \cdot k_{эз} \cdot \rho_{20}}{U_\phi^2 \cdot \eta \cdot h} = \frac{40 \cdot 100 \cdot 4190 \cdot 0,157 \cdot 1000}{220^2 \cdot 0,90 \cdot 20} = 3020,4 \text{ с}.$$

Мощность водонагревателя через 30 мин после включения:

$$P_\tau = P \cdot e^{\frac{\tau}{T}} = 18,5 \cdot e^{\frac{60 \cdot 30}{3020,4}} = 18,5 \cdot e^{0,596} \approx 33,6 \text{ кВт}$$

Температура воды через 30 мин после включения:

$$t_\tau = (20^\circ\text{C} + t_1) \cdot e^{\frac{\tau}{T}} - 20 = (20 + 20) \cdot e^{\frac{60 \cdot 30}{3020,4}} - 20 = 40 \cdot e^{0,596} - 20 = 52,6^\circ\text{C}.$$

Средняя мощность за период нагрева от 20 до 52,6°C равна:

$$P_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^T P \cdot e^{\frac{\tau}{T}} d\tau = \frac{T}{\tau} \cdot P \left( e^{\frac{\tau}{T}} - 1 \right) = \frac{60 \cdot 30}{3020,4} \cdot 18,5 \cdot (1,815 - 1) \approx 25,3 \text{ кВт.}$$

### Контрольные задания

1. Определить мощность и рассчитать электродную систему проточного однофазного водонагревателя с плоскими электродами. Объемный расход воды через водонагреватель равен  $L = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура на входе  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а на выходе –  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление воды при  $20^\circ\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Геометрический коэффициент  $k_{g2} = l/b$ , где  $l$  – расстояние между электродами, м;  $b$  – ширина электрода, м. Ширина пластин  $b = 15 \text{ см}$ , КПД = 0,98.

2. Определить минимально допустимое расстояние между пластинчатыми электродами водонагревателя, если  $\rho_{20} = 27 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а напряжение между электродами 380 В.

3. Рассчитать электродную систему проточного трехфазного водонагревателя, который должен быть установлен в системе горячего водоснабжения для технологических нужд предприятия и развивать мощность  $P = 10 \text{ кВт}$ . Температура на входе в электроводонагреватель  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а на выходе из него  $t_2 = 45^\circ\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление воды при  $20^\circ\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Водонагреватель подключается к трехфазной сети переменного тока с напряжением 380 В. Система электродов – плоская пластинчатая (табл. П. 7, схема 5), ширина пластин  $b = 10 \text{ см}$ . КПД = 0,975. Определить межэлектродное расстояние  $l$  и высоту пластин  $h$ , фактическую напряженность электрического поля между электродами  $E_{\text{факт}}$  и фактическую плотность тока на электродах  $j_{\text{факт}}$ .

4. Рассчитать электродный водонагреватель производительностью  $L = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$ , удельное сопротивление воды при  $20^\circ\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Температура поступающей из водопровода воды  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , а потребной –  $t_2 = 70^\circ\text{C}$ . Водонагреватель подключается к трехфазной сети переменного тока с напряжением 380 В. Система электродов представляет собой систему со стержневыми электродами (табл. П. 7, схема 2). Корпус цилиндрический, изготовленный из трубы диаметром  $d_k = 2r_k = 100 \text{ мм}$ . Радиус стержневых электродов принимаем из условия  $r_s = 0,21r_k$ . Стержни располагаются в вершинах равностороннего треугольника на расстоянии от оси цилиндра  $l = 25 \text{ мм}$  (из условия  $l = 0,51r_k$ ), КПД = 98%.

5. Рассчитать электродный водонагреватель для системы отопления. Тепловая мощность системы отопления  $\Phi = 210 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч}$ . Удельное электрическое сопротивление воды при  $20^\circ\text{C}$  равно  $\rho_{20} = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Температура воды на входе  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ , а на выходе –  $t_2 = 95^\circ\text{C}$ . Напряжение питающей сети 380/220 В. Система электродов представляет собой ци-

линдрическую коаксиальную систему (табл. П. 7, схема 1), КПД водонагревателя – 97%.

6. Электродная система водонагревателя емкостью  $V=100$  л с тремя экранированными коаксиальными электродами имеет размеры: диаметр наружного электрода  $d_n=4,3$  см, внутреннего  $d_{вн}=1,6$  см, высота электродов  $h=20$  см, начальная температура воды  $t_1=20^\circ\text{C}$ , КПД водонагревателя – 90%, напряжение питания  $U_n=380/220$  В. Удельное сопротивление воды  $\rho_{20}=1000$  Ом·см; удельная теплоемкость  $c=4190$  Дж/кг. Определить мощность водонагревателя и температуру воды через  $\tau=30$  мин после включения.

### Контрольные вопросы

1. Поясните физическую сущность процесса электродного нагрева.
2. Что такое температурная характеристика удельной проводимости (удельного сопротивления) воды?
3. Приведите примеры простейших типов электродных систем, и охарактеризуйте их основные параметры.
4. Что такое допустимые значения плотности тока или напряженности электрического поля при электродном нагреве?
5. Как определить мощность одной фазы нагревателя при известном фазном напряжении и размерах электродов?
6. В чем состоит задача расчета электродных нагревателей? Какие параметры задаются в качестве исходных данных?
7. Поясните формулу для определения высоты (длины) электродов.
8. Как определить среднюю мощность нагревателя через геометрические размеры электродов?
9. Приведите формулу зависимости мощности от температуры нагрева.
10. Какие существуют преимущества и недостатки электродного нагрева?
11. Поясните существующие принципы регулирования мощности водонагревателей.



## 4. Косвенный нагрев сопротивлением

Косвенный электрический нагрев сопротивлением является самым распространенным способом электронагрева, так как его техническая реализация достаточно проста и, реализуя его, можно нагревать любые материалы. При этом основным узлом, реализующим преобразование электрической энергии в тепловую, является нагревательный элемент, а нагрев среды происходит за счет теплопередачи конвекцией, излучением, теплопроводностью. Основным элементом нагревателя является нагревательная спираль из электропроводного материала с высоким удельным электрическим сопротивлением, как правило это нихром, которая закрепляется на специальных держателях – открытых нагревателях (нагревательное сопротивление не изолируется от нагреваемой среды) или помещается в корпус – трубку, изготовленную из стали или металлических сплавов. Электрические нагреватели, изготовленные в виде трубки с нагревательной спиралью внутри, получили название трубчатых электрических нагревателей (ТЭНов) или герметичных нагревателей.

### 4.1. Открытые нагревательные элементы из специальных сплавов и методы их расчета

Электрический расчет открытых нагревателей включает в себя выбор напряжения питания, определение геометрических размеров рабочих сопротивлений и разработку схемы их соединения с учетом требований к регулированию мощности установки.

Электрические открытые нагреватели рассчитывают по удельной поверхностной мощности (удельному поверхностному тепловому потоку) или по рабочему току.

Открытые нагревательные элементы характеризуются удельной поверхностной мощностью  $\Delta P$ , Вт/м<sup>2</sup>, электрических нагревателей:

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

где  $P_n$  – мощность нагревательного элемента, Вт;  $F$  – площадь поверхности теплоотдачи,  $\text{м}^2$ .

В установившемся режиме работы электрическая мощность, выделяющаяся в теле нагрева,  $P_{эл}$ , Вт:

$$P_{эл} = P_m = P, \quad (4.2)$$

где  $P_m$  – тепловая мощность, отдаваемая телом нагрева в окружающую среду, Вт.

Соответственно, удельная поверхностная электрическая мощность нагрева  $\Delta P_{эл}$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ :

$$\Delta P_{эл} = \frac{P_{эл}}{F} = \frac{I^2 \cdot r_t}{F} = \frac{4 \cdot I^2 \cdot \rho_t}{\pi^2 \cdot d_{np}^3}, \quad (4.3)$$

где  $I$  – ток нагревательного элемента, А;  $r_t$  – сопротивление нагревательного элемента, Ом;  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление материала нагревательного элемента, Ом·м;  $d_{np}$  – диаметр круглого провода, из которого выполнено тело нагрева, м,

равна тепловой удельной поверхностной мощности  $\Delta P_m$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ :

$$\Delta P_m = \frac{t - t_o}{R_m}, \quad (4.4)$$

где  $t$  – температура поверхности нагревательного элемента, °С;  $t_o$  – температура окружающей среды, °С;  $R_m$  – термическое сопротивление теплопередачи от нагревателя к окружающей среде,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ .

Допустимая удельная поверхностная мощность электрического нагревательного элемента  $\Delta P_{доп}$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , представляет собой удельную тепловую поверхностную мощность, которую имеет электрический нагреватель при максимально допустимой (для него) температуре и при которой он может работать длительно, не разрушаясь:

$$\Delta P_{доп} = \Delta P_{m(\max)} = \frac{t_{доп} - t_o}{R_m}. \quad (4.5)$$

Допустимая поверхностная мощность  $\Delta P_{доп}$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , проволочных открытых нагревателей определяется по формуле

$$\Delta P_{доп} = \Delta P_{доп(ид)} \cdot a_\varepsilon \cdot a_{ш} \cdot a_p \cdot a_c, \quad (4.6)$$

где  $\Delta P_{доп(ид)}$  – допустимая поверхностная мощность идеализированного нагревательного элемента, представляющего собой провод диаметром  $d_{np}=1$  мм, длиной 1 м, подвешенный горизонтально в спокойном воздухе, имеющем температуру 20°С,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $a_\varepsilon$  – коэффициент эффективности излучения;  $a_{ш}$  – коэффициент, учитывающий геометрию нагревателя

(коэффициент шага);  $a_p$  – коэффициент, учитывающий влияние относительных размеров нагревателя и нагреваемого тела;  $a_c$  – коэффициент, учитывающий теплопоглощающие свойства среды.

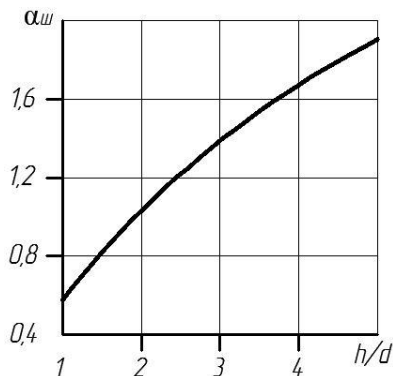
Коэффициент эффективности излучения  $a_\lambda$  характеризует эффективность излучения данной системы нагревателя (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Значения коэффициента эффективности при нагреве материала**

Тип нагревателя и способ укладки	Коэффициент эффективности $a_\lambda$ 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  $a_{ш}$  учитывает зависимость  $\Delta P_{дон}$  от относительного виткового расстояния  $h/d$  (рис. 4.1).

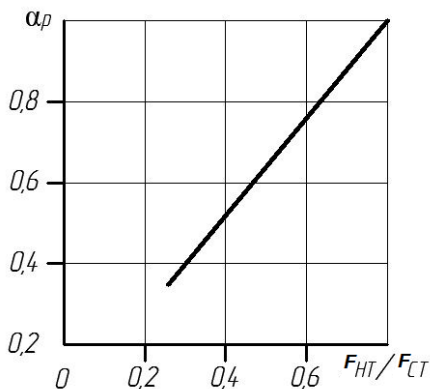


**Рис. 4.1. Зависимость коэффициента  $a_{ш}$ , учитывающего геометрию нагревателя, от соотношения  $h/d$**

Коэффициент  $a_p$  учитывает влияние относительных размеров нагреваемого тела на  $\Delta P_{дон}$  и зависит от отношения площади тепловоспринимающей поверхности нагреваемого тела  $F_{н.т.}$ , м<sup>2</sup>, к площади поверхности стен установки, занятых нагревателями,  $F_{ст.}$ , м<sup>2</sup>. При  $F_{н.т.}/F_{ст.} \geq 0,8$   $a_p=1$ ; при  $F_{н.т.}/F_{ст.} < 0,3$  поправки на размер

нагреваемого тела  $a_p$  и коэффициент, учитывающий теплопоглощающие свойства среды,  $a_c$  не вводят.

Коэффициент  $a_p$ , если отношение  $F_{н.т.}/F_{ст}$  меньше 0,3 и более 0,8, находят, используя график, представленный на рисунке 4.2.



**Рис. 4.2. Зависимость коэффициента  $a_p$ , учитывающего использование мощности нагревательных элементов**

Коэффициент  $a_c$  определяет влияние на удельную поверхностную мощность  $\Delta P_{доп}$  приведенного коэффициента излучения  $c_{np}$  реального нагревателя:

$$c_{np} = \frac{5,7}{\frac{1}{\varepsilon_{н.т.}} + \frac{F_{н.т.}}{F_{ст}} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_n} - 1 \right)}, \quad (4.7)$$

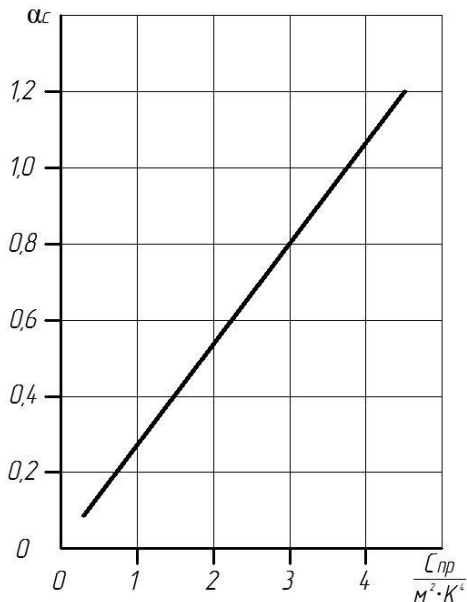
где  $\varepsilon_{н.т.}$  и  $\varepsilon_n$  – относительные коэффициенты теплового излучения (степень черноты) соответственно нагревателя и нагреваемого тела (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Коэффициенты теплового излучения некоторых материалов**

Материал	Температура $T$ , К	Степень черноты $\varepsilon$
Графит	1273-3703	0,77-0,83
Кирпич шамотный	293-1273	0,8-0,9
Латунь с тусклой поверхностью	323-623	0,22
Нихром	398-1308	0,64-0,75
Сталь	1213-1373	0,55-0,61
Цинк окисленный	673	0,11

Коэффициент  $\alpha_c$  находят, используя график, представленный на рисунке 4.3.



**Рис. 4.3.** Зависимость коэффициента  $\alpha_c$  от приведенного коэффициента излучения  $c_{пр}$

Для частного случая допустимую удельную поверхностную мощность  $\Delta P_{дон}$ , Вт/м<sup>2</sup>, нагревателей из проволоки круглого сечения, помещенных горизонтально в воздухе (подвешенных) при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  находят по формуле

$$\Delta P_{дон} = \frac{\Delta P_{дон(уд)}}{d_{пр}^{0,4}}, \quad (4.8)$$

где  $d_{пр}$  – диаметр проволоки нагревательного элемента, м.

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

*Аналитический метод.* Для нагревателей, изготовленных из заготовок круглого сечения (проволока, прутки) диаметр нагревательного элемента (м) можно определить по формуле

$$d_{np} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot I^2}{\pi^2 \cdot \Delta P_{\text{дон}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P_n^2}{\pi^2 \cdot \Delta P_{\text{дон}} \cdot U_n^2}}, \quad (4.9)$$

где  $U_n$  – напряжение на нагревательном элементе, В;  $P_n$  – мощность нагревательного устройства, Вт;  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление материала нагревательного элемента при конечной температуре нагрева, Ом·м.

Длина провода (м) нагревательного элемента определяется по следующей формуле

$$l = \sqrt[3]{\frac{U_n^2 \cdot P_n}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \Delta P_{\text{дон}}^2}}. \quad (4.10)$$

Масса нагревателя (кг) при его круглом сечении определяется по формуле

$$m_n = \delta_n \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_t \cdot P_n^5}{160 \cdot \pi^2 \cdot U_n^2 \cdot \Delta P_{\text{дон}}^4}}, \quad (4.11)$$

где  $\delta_n$  – плотность материала нагревательного элемента, кг/м<sup>3</sup>.

*Графо-аналитический метод.* Рассчитываются и строятся зависимости удельной поверхностной и удельной допустимой поверхностной мощностей от диаметра проволоки нагревателя  $\Delta P_{\text{эл}} = f(d_{np})$  и  $\Delta P_{\text{дон}} = f(d_{np})$  на одном графике.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{эл}} &= \frac{4 \cdot P_n^2 \cdot \rho_t}{\pi^2 \cdot d_{np}^2 \cdot U_n^2} \\ \Delta P_{\text{дон}} &= \frac{\Delta P_{\text{дон}(u\theta)}}{d_{np}^{0,4}} \end{aligned} \right\}. \quad (4.12)$$

По графикам находят оптимальный (минимально допустимый) диаметр проволоки нагревателя  $d_{np\text{опт}}$ , м, который определяется в точке пересечения зависимостей  $\Delta P_{\text{эл}} = f(d_{np})$  и  $\Delta P_{\text{дон}} = f(d_{np})$ . Слева от точки пересечения рабочая температура считается большей по отношению к допустимой, а справа – меньшей. Для дальнейших расчетов принимается ближайший больший диаметр в ряду стандартных диаметров проволоки  $d_{np}$ , м:

$$d_{np} \geq d_{np\text{опт}} \quad (4.13)$$

Определяется длина  $l$ , м, провода нагревательного элемента:

$$l = \frac{\pi \cdot r_t \cdot d_{np}^2}{4 \cdot \rho_t} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2 \cdot U_n^2}{4 \cdot P \cdot \rho_t}. \quad (4.14)$$

*Приближенный метод расчета нагревателей из специальных сплавов по таблицам нагрузок.* Вначале определяется рабочий ток  $I_1$ , А, нагревательного элемента по следующей формуле

$$I_1 = \frac{P_{1n}}{U_n}, \quad (4.15)$$

где  $P_{1n}$  – мощность одного нагревательного элемента, Вт;  $U_n$  – напряжение, подводимое к нагревательному элементу, В.

Расчетная температура  $t_{расч}$ , °С, нагревателя, приведенная к условиям таблицы нагрузок нихромовых проводов, определится по формуле:

$$t_{расч} = t_{раб} \cdot k_m \cdot k_c, \quad (4.16)$$

где  $t_0$  – действительная температура спирали,  $t_0 \approx 800 \dots 1100^\circ\text{C}$ ;  $k_m$  – коэффициент монтажа, учитывающий ухудшение охлаждения по сравнению со стандартными условиями (вытянутая проволока при неподвижном воздухе), поэтому коэффициент монтажа всегда меньше единицы;  $k_c$  – коэффициент среды, учитывающий улучшение охлаждения, поэтому он всегда больше единицы.

Выбор диаметра провода осуществляется с использованием таблицы нагрузок (табл. П. 6) по полученным значениям рабочего тока  $I_1$  и расчетной температуры  $t_{расч}$ , исходя из условий  $I \geq I_1$  и  $t \leq t_{расч}$  при возможно меньшем отличии табличных значений от расчетных.

Коэффициент монтажа учитывает ухудшение теплоотдачи нагревательного элемента при завивке провода в спираль (табл. 4.3). Меньшие значения  $k_m$  берут для меньших диаметров проволоки, большие – для больших.

Коэффициент среды  $k_c$  учитывает улучшение теплопередачи в подвижной среде (табл. 4.4).

Для принятого провода рассчитывают погонные сопротивления при температуре  $t=20^\circ\text{C}$  ( $r$ , Ом/м) и  $t=t_{раб}$  ( $r_{раб}$ , Ом/м):

$$r = \frac{\rho_{20}}{F}, \quad (4.17)$$

$$r_{раб} = r_{20} \cdot \left(1 + \alpha_t \cdot (t_{раб} - 20^\circ\text{C})\right), \quad (4.18)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление материала провода при температуре 20°C, Ом·м;  $F$  – площадь сечения принятого провода, м<sup>2</sup>;  $\alpha_t$  – температурный коэффициент изменения сопротивления материала провода, °C<sup>-1</sup>.

Таблица 4.3

### Значения коэффициента монтажа

Конструктивное выполнение нагревателя	$k_m$
Проволока, натянутая горизонтально в спокойном воздухе	1,0
Проволочная спираль в спокойном воздухе	0,8-0,9
Проволочная спираль на огнеупорном держателе в спокойном воздухе	0,7
Проволока, навитая на огнеупорный держатель в спокойном воздухе	0,6-0,7
Нагревательные сопротивления между двумя слоями тепловой изоляции (закрытые электроплитки, некоторые трубчатые электронагреватели)	0,5
Нагревательные сопротивления с мощной тепловой изоляцией (ТЭНы, электрообогреватели почвы, полы и т.п.)	0,3-0,4

Таблица 4.4

### Значения коэффициента среды

Условия окружающей (нагреваемой) среды	$k_c$
Проволочная спираль в воздушном потоке, скорость которого: 3-5-10 м/с	1,8-2,1-3,1
Нагревательные элементы, погруженные в воду	2,5
Нагревательные элементы, омываемые потоком жидкости	3-3,5

Сопротивление нагревательного элемента  $r_1$ , Ом:

$$r_1 = \frac{U_n}{I_1}. \quad (4.19)$$

Исходя из величины сопротивления проводника  $r_1$ , Ом и погонного сопротивления при рабочей температуре  $r_{раб}$ , Ом/м, определяется длина провода  $l_1$ , м для одного нагревательного элемента:

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

Расчет конструктивных размеров нагревательного элемента состоит из определения диаметра спирали  $D_{cn}$ , м, шага спирали  $h$ , м, числа витков спирали  $m$ , длины спирали  $L_{cn}$ , м.

Следует иметь ввиду, что расстояние  $l_k$ , м, между точками крепления спирали (во избежание вибрации и её деформации под действием потока воздуха) должно соответствовать условию  $l_k \leq 10 \dots 15 D_{cn}$ .



Диаметр витков спирали  $D_{cn}$  из нихромовых сплавов принимается равным, м:

$$D_{cn} = (8...10) \cdot d_{np}. \quad (4.21)$$

Диаметр витков спирали  $D_{cn}$  для железохромоалюминиевых сплавов принимается равным, м:

$$D_{cn} = (8...10) \cdot d_{np}. \quad (4.22)$$

Шаг витков, м:

$$h = (2...4) \cdot d_{np}. \quad (4.23)$$

Количество витков спирали:

$$m = \frac{l}{\sqrt{(\pi \cdot D_{cn})^2 + h^2}}. \quad (4.24)$$

Длина спирали, м:

$$L_{cn} = m \cdot h. \quad (4.25)$$

## 4.2. Трубочатые электрические нагреватели и методы их расчета

Электрический расчет нагревательного устройства заключается в разработке схемы соединения нагревателя с учетом требований к регулированию мощности установки, а также в выборе напряжения питания и определении геометрических размеров рабочих нагревателей при рабочей температуре, не превышающей допустимого значения.

При электрическом расчёте ТЭНа необходимо задаться действительной температурой спирали, выполняемой, как правило, из нихромовой проволоки, и определить расчетную температуру, °С:

$$t_{расч} = t_{\delta} \cdot k_m \cdot k_c, \quad (4.26)$$

где  $t_{\delta}$  – действительная температура спирали,  $t_{\delta} \approx 800...1100^{\circ}\text{C}$ ;  $k_m$  – коэффициент монтажа, учитывающий ухудшение охлаждения по сравнению со стандартными условиями (вытянутая проволока при неподвижном воздухе), поэтому коэффициент монтажа всегда меньше единицы;  $k_c$  – коэффициент среды, учитывающий улучшение охлаждения, поэтому он всегда больше единицы.

Результаты расчетов в значительной мере зависят от достоверности значения коэффициентов монтажа и среды  $k_m$  и  $k_c$ . Значения  $k_m$  и  $k_c$  приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

По значению мощности ТЭНа и приложенного напряжения определяется рабочий ток, А:

$$I = \frac{P_n}{U_n}, \quad (4.27)$$

где  $P_n$  – мощность ТЭНа, Вт;  $U_n$  – напряжение на ТЭН, В.

По расчетной температуре спирали и значению рабочего тока ТЭНа находят соответствующий диаметр проволоки  $d_{np}$  согласно данным таблицы П. 6.

Требуемая длина проволоки нагревательного элемента ТЭНа определяется из формулы, м:

$$l_{np} = \frac{U_n^2 \cdot F_{np}}{P_n \cdot \rho_t}, \quad (4.28)$$

где  $F_{np}$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>;  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление проводника в зависимости от температуры, Ом·м/мм<sup>2</sup>.

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_0 - 20^\circ C)), \quad (4.29)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление нихрома при 20°C,  $\rho_{20} = 1,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления нихрома,  $\alpha = 1,65 \cdot 10^{-6}$  1/°C.

Средний диаметр витков спирали  $D_{cp}$  принимается равным, м:

$$D_{cp} = (8 \dots 10) \cdot d_{np}. \quad (4.30)$$

Шаг витков, м:

$$h = (2 \dots 4) \cdot d_{np}. \quad (4.31)$$

Количество витков спирали:

$$m = \frac{l_{np} \cdot 10^3}{\sqrt{(\pi \cdot D_{cp})^2 + h^2}}. \quad (4.32)$$

Длина спирали, м:

$$L_c = m \cdot h. \quad (4.33)$$

Наружный диаметр трубки, м:

$$D_n = (2,5 \dots 3) \cdot D_{cp}. \quad (4.34)$$

Наружный диаметр трубки не должен превышать значения 16...18 мм, в противном случае необходимо уменьшить мощность ТЭНа.

Полная длина ТЭНа, м:

$$L_{\text{полн}} = L_c + 2 \cdot L_n, \quad (4.35)$$

где  $L_n$  – длина пассивной части трубки ТЭНа, может быть принята в зависимости от мощности ТЭНа от 0,02 до 0,1 м.

В тех случаях, когда температура поверхности ТЭНа по технологическим условиям должна быть ограничена, например в связи с тем, что температура теплоотдающей поверхности оребренного ТЭНа электрокалорифера не должна превышать 200...250°C, то необходимо осуществить его тепловой расчет.

Тепловой расчет ТЭНов заключается в определении действительной температуры поверхности оребрения и удельной поверхностной мощности ТЭНа.

Диаметр оребрения  $D_{op}$  ориентировочно может быть принят равным, м:

$$D_{op} = (2...3) \cdot D_n. \quad (4.36)$$

Температура поверхности оребрения ТЭНа может быть определена из уравнения теплового баланса в установившемся режиме, когда тепловой поток, выделяемый нагревательным сопротивлением, равняется тепловому потоку, снимаемому с его теплоотдающей поверхности, Вт:

$$P_n = \alpha \cdot (t_m - t_e) \cdot F_m, \quad (4.37)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНа, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_m$  – температура теплоотдающей поверхности ТЭНа, °C;  $t_e$  – температура воздуха, обдувающего нагревателя, °C;  $F_m$  – площадь теплоотдающей поверхности ТЭНа, м<sup>2</sup>.

Отсюда

$$t_m = \frac{P_n + \alpha \cdot F_m \cdot t_e}{\alpha \cdot F_m}. \quad (4.38)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  может быть определён по формуле

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{b}, \quad (4.39)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\lambda=0,027$  Вт/м;  $b$  – шаг ребер.

Ориентировочно шаг ребер можно определить как

$$b = \frac{D_n}{3 \dots 4}. \quad (4.40)$$

Критерий Нуссельта равен:

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot \left( \frac{D_n}{b} \right)^{-0,54} \left( \frac{h_p}{b} \right)^{-0,14}, \quad (4.41)$$

где  $c$ ,  $m$  – коэффициенты соответственно равны 0,104 и 0,72 для коридорного расположения ТЭНов и 0,223 и 0,65 – для шахматного расположения;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $h_p$  – высота ребра, м.

Высота ребра определяется из выражения, м:

$$h_p = \frac{D_{op} - D_n}{2}. \quad (4.42)$$

Критерий Рейнольдса определяет режим обтекания ТЭНов воздухом и равен:

$$Re = \frac{v_e \cdot b}{\nu}, \quad (4.43)$$

где  $v_e$  – скорость нагреваемого от ТЭНов воздуха, обычно около 6-8 м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\nu = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Площадь теплоотдающей поверхности ТЭНа равна:

$$F_m = F_{op} + F_{mp}, \quad (4.44)$$

где  $F_{op}$  – площадь поверхности оребрения,  $\text{м}^2$ ;  $F_{mp}$  – площадь наружной поверхности трубки, свободной от ребер,  $\text{м}^2$ ,

$$F_{op} = f_e \cdot m_p, \quad (4.45)$$

где  $f_e$  – площадь одного витка оребрения,  $\text{м}^2$ ;  $m_p$  – число ребер.

Площадь оребрения будет равна  $\text{м}^2$ :

$$F_{op} = \left( \frac{\pi D_{op}^2}{4} - \frac{\pi D_n^2}{4} \right) \cdot 2m_p = \frac{\pi \cdot m_p}{2} (D_{op}^2 - D_n^2) \quad (4.46)$$

Число ребер  $m_p$  определяется по формуле

$$m_p = \frac{L_c}{b}. \quad (4.47)$$

При определении общей площади теплоотдачи площадью  $F_{mp}$  можно пренебречь, так как она обычно составляет не более 3...5% от  $F_{op}$ . При уточненном расчете эту площадь необходимо учесть.

Удельная поверхностная мощность равна, Вт/см<sup>2</sup>:

$$\Delta P = \frac{P_n}{F_m}. \quad (4.48)$$

Предельно допустимые значения  $\Delta P$  приведены в таблице П. 10.

Удельная поверхностная мощность для случая передачи тепла теплопроводностью может быть определена как, Вт/м<sup>2</sup>:

$$\Delta P = \frac{\Delta t}{r_m}, \quad (4.49)$$

где  $r_m$  – термическое сопротивление, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

В реальных электронагревательных установках термическое сопротивление выражается сложными зависимостями, которые определяются формой и размерами нагревателей и электрической изоляции, однородностью нагреваемых материалов. Нагреватели очень часто изготавливают в виде многослойных концентрических цилиндров, в частности таковыми являются неоребренные трубчатые нагреватели. Внутри металлической трубки расположена нихромовая спираль, изолированная от корпуса трубки наполнителем. Термическое сопротивление потоку тепла от спирали к трубке, отнесенное к 1 м длины нагревателя, определяется полуэмпирической зависимостью, (м·°C)/Вт:

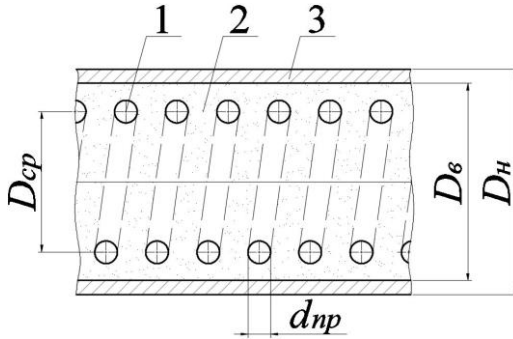
$$r_{m1} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_1} \cdot \left[ \ln \frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{сп}}} + 10^{-3} \left( 0,5 + 0,59 \frac{d_{\text{нп}}}{D_{\text{сп}}} \right) \left( \frac{h}{d_{\text{нп}}} - 1 - 6,56 \left( \frac{d_{\text{нп}}}{D_{\text{вн}}} \right)^{0,38} \right) \right], \quad (4.50)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности наполнителя, Вт/(м·°C);  $D_{\text{сп}}$  – средний диаметр спирали, м;  $d_{\text{нп}}$  – диаметр нагревательного провода (диаметр нихромовой проволоки спирали), м;  $h$  – шаг витков спирали, м;  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр цилиндрической трубки (стенки), м.

Термическое сопротивление наружной однослойной цилиндрической стенки длиной 1 м, (м·°C)/Вт:

$$r_{m2} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_2} \cdot \ln \left[ \frac{D_n}{D_{\text{вн}}} \right], \quad (4.51)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности стенки (трубки), Вт/(м·°C);  $D_n$  – наружный диаметр цилиндрической трубки (стенки), м.



**Рис. 4.4. Разрез трубчатого нагревателя (ТЭНа):**

1 – нихромовая проволока; 2 – наполнитель; 3 – трубка (корпус)

Суммарное термическое сопротивление от спирали к наружной поверхности (стенки) нагревателя,  $(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ :

$$r_{ml} = r_{ml1} + r_{ml2}. \quad (4.52)$$

Мощность с 1 м нагревателя определяется по формуле,  $\text{Вт}/\text{м}$ :

$$\Delta P_l = \frac{\Delta t}{r_{ml}}, \quad (4.53)$$

где  $\Delta t$  – температурный перепад между спиралью и наружной поверхностью,  $^\circ\text{C}$ .

Для перехода к удельной поверхностной мощности следует выполнить следующие действия. Поверхность проволоки равна поверхности некоторого эквивалентного цилиндра диаметром  $D_3$ , для которого термическое сопротивление 1 м наполнителя, согласно выражению (4.51), равно:

$$r_{ml1} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_1} \cdot \ln \left[ \frac{D_{\text{BH}}}{D_3} \right]. \quad (4.54)$$

Из выражения (4.54) диаметр эквивалентного цилиндра (м) можно определить, как

$$D_3 = e^{(\ln D_e - 2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 \cdot r_{ml1})}. \quad (4.55)$$

Удельное термическое сопротивление тепловому потоку с  $1 \text{ м}^2$  поверхности проволоки,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ :

$$r_m = r_{ml} \cdot \pi \cdot D_3 \cdot 10^{-3}. \quad (4.56)$$

Удельная поверхностная мощность может быть определена по выражению (4.49).

### 4.3. Схемы включения нагревательных элементов и способы регулирования мощности электротермических установок

Нагревательные элементы электротермических установок рассчитаны на конкретные значения мощности и напряжения. Чтобы обеспечить номинальный режим, их подключают к питающей сети соответствующего напряжения.

В процессе работы электротермической установки, например, электронагревателя сопротивления, мощность электрических нагревателей можно регулировать, изменяя напряжение питания  $U_n$  или сопротивление нагревателя  $R_n$ . Наиболее просто мощность регулировать ступенчато, переключая нагревательные элементы таких установок на различные схемы соединения. При этом изменяется либо число подключенных к сети элементов и их общее сопротивление, либо напряжение на каждом из них.

Нагреватели мощностью до 1 кВт обычно выполняют однофазными, а свыше 1 кВт – трёхфазными.

Однофазные нагревательные установки с регулируемой мощностью имеют два и более нагревательных элемента (секции). Регулируют мощность таких установок переключением секций, включая их параллельно или последовательно. Так, максимальная мощность будет при параллельно включённых секциях:

$$P_{нар} = \frac{U^2}{R} = \frac{n \cdot U^2}{R_{1n}}, \quad (4.57)$$

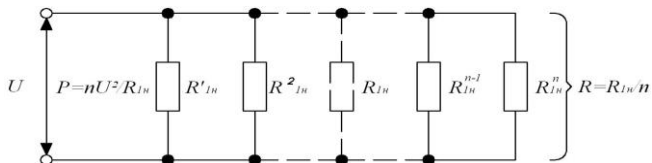
где  $R_{1n}$  – сопротивление одного нагревателя, Ом;  $n$  – число секций в электротермической установке.

В случае последовательно включённых секций мощность будет минимальной:

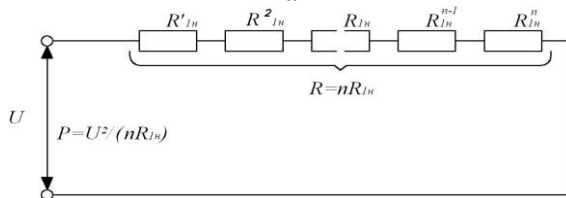
$$P_{носл} = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{n \cdot R_{1n}}. \quad (4.58)$$

Отношение этих мощностей при одинаковом значении питающего напряжения составляет:

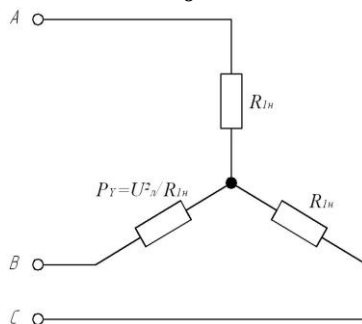
$$P_{нар} / P_{носл} = n^2. \quad (4.59)$$



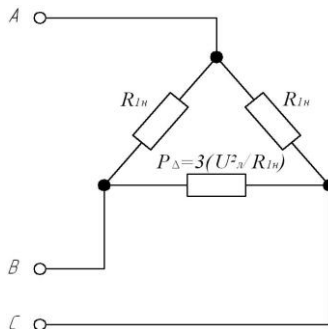
**а**



**б**



**в**



**г**

**Рис. 4.5. Схемы включения нагревательных секций:**  
 а, б – однофазных (параллельное и последовательное включение);  
 в, г – трёхфазных (по схеме включения «звезда» и «треугольник»)  
 электронагревательных устройств



Для трёхфазных установок число секций должно быть кратно трём, поэтому с учётом того, что такое соединение представляет собой симметричную систему:

$$P = 3 \cdot P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi. \quad (4.60)$$

Для трёхфазных установок, у которых элементы в секциях соединены:

– по схеме «звезда»:

$$P_{зв} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{R_{1н}} = \frac{U_{л}^2}{R_{1н}}, \quad (4.61)$$

– по схеме «треугольник»:

$$P_{тр} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{л}^2}{R_{1н}}. \quad (4.62)$$

Отношение мощностей:

$$\frac{P_{тр}}{P_{зв}} = \frac{3}{1}. \quad (4.63)$$

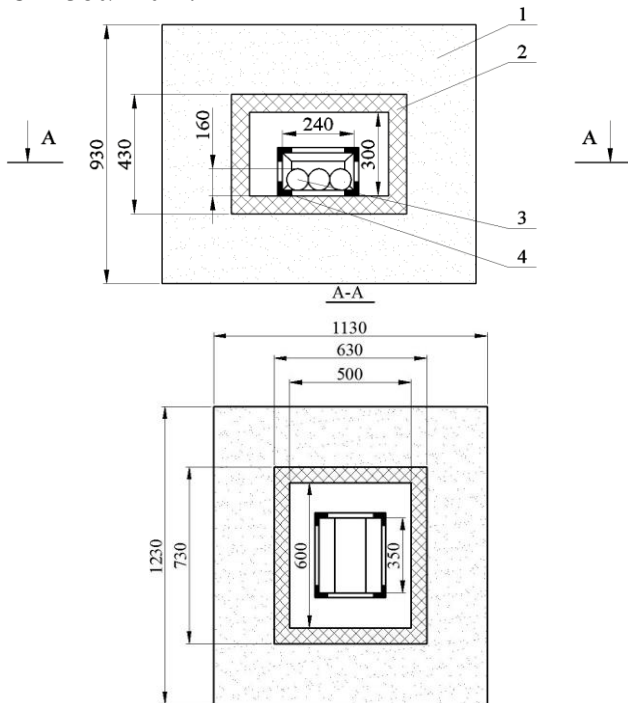
Изменяя схему включения нагревательных элементов, мощность можно регулировать ступенчато, что применимо, когда не требуется точное поддержание температуры, и такое регулирование называется ступенчатым. Регулировать мощность ЭТУ сопротивлением также можно, отключая или включая часть электронагревательных элементов или полностью всей установки. Такой принцип изменения мощности ЭТУ сопротивлением достаточно просто реализовать на практике, используя для этих целей релейно-контактную коммутационную аппаратуру.

Изменением напряжения питания  $U$  можно плавно регулировать мощность и более точно поддерживать температуру.

### Примеры решения задач

**Задача 4.1.** Рассчитать закалочную печь мощностью 15 кВт, для нагрева стальных стержней диаметром  $D = 80$  мм и длиной  $l = 350$  мм. В печь одновременно укладывается  $n = 6$  деталей, изготовленных из стали (плотность стали  $\delta = 7,8$  кг/дм<sup>3</sup>; теплоемкость стали  $c = 0,482$  кДж/(кг·°C)). Между деталями и тепловой изоляцией рекомендуется зазор размером  $\Delta = 110$ -140 мм. Продолжительность нагрева  $\tau = 2$  ч. Температура закалки  $t_3 = 870^{\circ}\text{C}$ , наруж-

ная –  $t_n = 20^\circ\text{C}$ . Тепловая изоляция состоит из двух слоев: первый слой толщиной  $\Delta_{ш} = 65$  мм – из шамотовых кирпичей; второй слой – вермикулитовая засыпка толщиной  $\Delta_v = 250$  мм. Напряжение сети  $U = 380/220$  В.



**Рис. 4.6. Эскиз футеровки закалочной печи:**

1 – слой теплоизоляции; 2 – слой огнеупорной изоляции; 3 – нагреваемые детали; 4 – контейнер из жаропрочной стали

### Решение

Приведённый коэффициент излучения изделия  $c_{np}$ :

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

где  $\varepsilon_{н.т.}$  и  $\varepsilon_n$  – степень черноты материала нагреваемого тела и нагревателя, для стали и нихрома примем  $\varepsilon_{н.т.}=0,8$  и  $\varepsilon_n=0,8$ .

Удельная поверхностная мощность  $\Delta P_{уд}$  для идеального нагрева:

$$\Delta P_{уд} = c_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{н.м.}}{100} \right)^4 \right) = 3,8 \cdot \left( \left( \frac{1373}{100} \right)^4 - \left( \frac{1143}{100} \right)^4 \right) \cdot 10^{-4} =$$

$$= 7,13 \text{ Вт/см}^2,$$

где  $T_n$  и  $T_{н.м.}$  – абсолютные температуры нагревателя и нагреваемого тела, К.

Температуру нагревателя из нихрома примем равной  $t = 1100^\circ\text{C}$ .

Коэффициент, учитывающий неполное использование мощности нагревательных элементов,  $a_p$  зависит от соотношения площадей нагреваемого тела  $F_{н.м.}$  и поверхности стен, занятой нагревателями,  $F_{cm}$ . Согласно расчету тепловой изоляции печи (см. задачу 1.10), ее внутренняя поверхность  $F_{вн} = 1,26 \text{ м}^2$ , из которой только:

$$F_{cm} = [0,6 \cdot 0,5 + (0,3 \cdot 0,6) \cdot 2 + 0,5 \cdot 0,3] = 0,81 \text{ м}^2$$

занято нагревателями (без использования для размещения нагревателей двери и свода). Поверхность нагреваемых тел (изделий):

$$F_{н.м.} = \pi \cdot D \cdot l \cdot \left( \frac{n}{2} + 1 \right) + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot n = 3,14 \cdot 0,08 \cdot 0,35 \cdot \left( \frac{6}{2} + 1 \right) + \frac{3,14 \cdot 0,08^2}{4} \cdot 6 =$$

$$= 0,382 \text{ м}^2.$$

Коэффициент  $a_p$  находят по графику, приведенному на рисунке 4.2, тогда при  $\frac{F_{н.м.}}{F_{cm}} = \frac{0,382}{0,81} \approx 0,47$   $a_p = 0,6$ .

Принимается конструкция нагревателей в виде проволочных спиралей, расположенных на полочках. Из таблицы 4.1 выбирается коэффициент эффективности системы для данной конструкции  $a_3 = 0,32$ .

Минимальное витковое расстояние  $h/d_{np} = 3$ . Коэффициент, учитывающий геометрию нагревателя,  $a_{и} = 1,4$  (рис. 4.1).

Реальная удельная поверхностная мощность  $\Delta P_{реал}$ :

$$\Delta P_{дон} = \Delta P_{дон(уд)} \cdot a_3 \cdot a_{и} \cdot a_p \cdot a_c = 7,13 \cdot 0,32 \cdot 1,4 \cdot 0,6 \cdot 1 = 1,92 \text{ Вт/см}^2.$$

Мощность одной фазы  $P_\phi$  трехфазного нагревательного устройства:

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

Диаметр электрических нагревателей  $d_{np}$  из нихромовой проволоки при напряжении на нагревателе  $U_n=380$  В при схеме соединения «треугольник» (предварительно):

$$d_{np} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot \rho_t \cdot P_\phi^2}{\pi^2 \cdot \Delta P_{\text{дон}} \cdot U_n^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 1,15 \cdot 5^2}{3,14^2 \cdot 1,92 \cdot 380^2}} = 1,6 \text{ мм},$$

где  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление материала провода, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м; для нихрома  $\rho_t=1,15$  (Ом·мм<sup>2</sup>)/м.

Сопротивление фазы нагрузки  $R_\phi$ :

$$R_\phi = \frac{U_n^2}{10^3 \cdot P_\phi} = \frac{380^2}{10^3 \cdot 5} = 28,8 \text{ Ом}.$$

Длина проволоки  $l_\phi$  на фазу:

$$l_\phi = \frac{R_\phi \cdot \pi \cdot d_{np}^2}{4 \cdot \rho_t} = \frac{28,8 \cdot 3,14 \cdot 1,6^2}{4 \cdot 1,15} \approx 50,4 \text{ м}.$$

Диаметр спирали  $D_{cn}$  при диаметре провода  $d_{np} \leq 3$  мм:

$$D_{cn} = 10 \cdot d_{np} = 10 \cdot 1,6 = 16 \text{ мм}.$$

Длина витка спирали  $l_g$ :

$$l_g = \pi \cdot D_{cn} = 3,14 \cdot 16 = 50,3 \text{ мм}.$$

Количество витков на одну фазу устройства  $m_{\phi 1}$ :

$$m_{\phi 1} = \frac{l_\phi}{l_g} = \frac{50,4}{50,3 \cdot 10^{-3}} = 1000 \text{ витков}.$$

Шаг спирали  $h$ , мм, определяется из принятого соотношения  $h/d_{np}=3$ :

$$h = 3 \cdot d_{np} = 3 \cdot 1,6 = 4,8 \text{ мм}.$$

Длина спирали  $l_{cn.1}$  на одну фазу:

$$l_{cn.1} = m_{\phi 1} \cdot h = 1000 \cdot 4,8 = 4,8 \text{ м}.$$

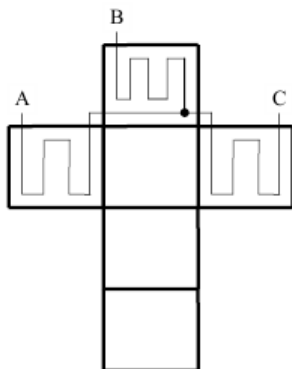
Общая длина спирали  $l_{cn}$ :

$$l_{cn} = l_{cn.1} \cdot 3 = 4,8 \cdot 3 = 14,4 \text{ м}.$$

Такое количество нагревательных элементов разместить в печи затруднительно. Поэтому необходимо снизить напряжение до  $U_n=220$  В, то есть нагреватели соединить по схеме «звезда» и все расчеты, начиная с определения диаметра нагревательной проволоки, повторить.

В результате повторных расчетов получаем:  $d_{np}=2,5$  мм;  $R_\phi=9,6$  Ом;  $l_\phi=41,1$  м;  $D_{cn}=25$  мм;  $l_g=78,5$  мм;  $m_{\phi 1}=523$  витка;

$h = 7,5$  мм;  $l_{cn.1} = 3,92$  м;  $l_{cn} = 11,8$  м. Полученные расчетные параметры нагревателей позволяют разместить их в поду на боковых и задней стенке.



**Рис. 4.7. Развертка нагревательной печи с изображением схемы подключения нагревательных элементов**

Срок службы  $\tau$ , ч, нагревательных элементов из нихрома:

$$\tau = d_{np} \cdot \tau_{np} \cdot k_{\phi} = 2,5 \cdot 500 \cdot 1,0 = 1250 \text{ ч,}$$

где  $\tau_{np}$  – срок службы нагревателя при диаметре провода  $d_{np}=1$  мм, для сплава Х23Н18 при  $t=1100^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{np}=500$  ч;  $k_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий форму сечения нагревателя, для круглой проволоки  $k_{\phi}=1,0$ .

При семичасовом рабочем дне и односменной работе срок службы нагревателей составит 180 рабочих дней. Для увеличения срока службы надо взять сплав Х15Н60К3, для которого  $\tau_{np}=2000$  ч и  $\tau = 5000$  ч, что позволит работать нагревателям более 2 лет без замены.

**Задача 4.2.** Рассчитать электрический нагреватель в виде открытой проволочной спирали по допустимой удельной поверхностной мощности  $\Delta P$ . Мощность нагревателя  $P = 2,5$  кВт; напряжение питания  $U = 220$  В; материал провода – нихром Х20Н80 (сплав из 20% хрома и 80% никеля), его удельное электрическое сопротивление  $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$  1/ $^{\circ}\text{C}$ ; спираль открытая, находится в металлической пресс-форме, рабочая температура спирали  $t_{cn} = 400^{\circ}\text{C}$ ; значение допустимой удельной поверхностной мощности  $\Delta P = 12 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

### Решение

Сопротивление проволочной спирали:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{2500} = 19,36 \text{ Ом.}$$

Удельное электрическое сопротивление при  $t_{cn} = 400^\circ\text{C}$

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha\theta) = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 16 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20)) = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Определяем диаметр провода:

$$d_{np} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot P^2}{U^2 \cdot \pi^2 \cdot \Delta P}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot 2500^2}{220^2 \cdot 3,14^2 \cdot 12 \cdot 10^4}} = 0,00078 \text{ м} = 1 \text{ мм.}$$

Из выражения  $R = \frac{\rho \cdot l}{F}$ , учитывая, что  $F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , получим,

что длина провода равна:

$$l_{np} = \frac{\pi \cdot R \cdot d_{np}^2}{4 \cdot \rho} = \frac{3,14 \cdot 19,36 \cdot 0,001^2}{4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} = 13,8 \text{ м.}$$

Средний диаметр витка спирали:

$$D_{cp} = 10 \cdot d_{np} = 10 \cdot 0,001 = 0,01 \text{ м} = 10 \text{ мм.}$$

Шаг спирали:

$$h = 3 \cdot d_{np} = 3 \cdot 0,001 = 0,003 \text{ м} = 3 \text{ мм.}$$

Число витков спирали:

$$m = \frac{l}{\sqrt{(\pi \cdot D_{cp})^2 + h^2}} = \frac{13,8}{\sqrt{(3,14 \cdot 0,01)^2 + 0,003^2}} = 437,498 \approx 438.$$

Длина спирали:

$$l_{cn} = h \cdot m = 0,003 \cdot 438 = 1,314 \text{ м} = 1314 \text{ мм.}$$

**Задача 4.3.** Рассчитать конструктивные параметры проволочного нагревателя сопротивления в виде открытой проволочной спирали по таблицам токовых нагрузок. Мощность проволочного нагревателя  $P_n = 3146$  Вт; напряжение питания  $U = 220$  В; материал провода – нихром Х20Н80 (сплав из 20% хрома и 80% никеля), его удельное электрическое сопротивление  $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$  1/°С; спираль открытая, расположенная в потоке воздуха ( $k_m = 0,85$ ,  $k_c = 2,0$ ), допустимая рабочая температура провода  $t_{дон} = 470^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определяем расчетную температуру:

$$t_{расч} = t_{раб} \cdot k_m \cdot k_c = 0,85 \cdot 2,0 \cdot 470 = 800^\circ\text{C}.$$

Ток проектируемого нагревателя равен:

$$I = \frac{P_n}{U} = \frac{3146}{220} = 14,3 \text{ А}.$$

По таблице токовых нагрузок (табл. П. 6) при расчетной температуре  $t_{расч} = 800^\circ\text{C}$  и рабочем токе  $I = 14,3 \text{ А}$  находим диаметр и сечение проволочного нагревателя  $d_{np} = 1,0 \text{ мм}$  и  $S = 0,785 \text{ мм}^2$ .

Длина нагревательного провода:

$$l_{np} = \frac{R \cdot F}{\rho_t} = \frac{\frac{U^2}{P_n} \cdot F}{\rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_p - 20))} = \frac{\frac{220^2}{3146} \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 16 \cdot 10^{-6} \cdot (800 - 20))} = \\ = \frac{15,3 \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}}{1,11 \cdot 10^{-6}} = 10,9 \text{ м}.$$

Средний диаметр витка спирали:

$$D_{cp} = 10 \cdot d_{np} = 10 \cdot 0,001 = 0,01 \text{ м} = 10 \text{ мм}.$$

Шаг спирали:

$$h = 3 \cdot d_{np} = 3 \cdot 0,001 = 0,003 \text{ м} = 3 \text{ мм}.$$

Число витков спирали:

$$m = \frac{l}{\sqrt{(\pi \cdot D_{cp})^2 + h^2}} = \frac{9,8}{\sqrt{(3,14 \cdot 0,01)^2 + 0,003^2}} = 311.$$

Длина спирали:

$$l_{cn} = h \cdot m = 0,003 \cdot 311 = 0,933 \text{ м} = 93,3 \text{ мм}.$$

**Задача 4.4.** Определить необходимую длину стальной оцинкованной проволоки (удельное электрическое сопротивление  $\rho_{20} = 0,135 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,0045 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ) диаметром  $d_{np} = 3 \text{ мм}$  для обогрева почвы в парниках. Мощность обогрева  $P = 10 \text{ кВт}$ . Проволока прокладывается в асбоцементных трубах, заложенных в подпочвенный слой. По экспериментальным данным, термическое сопротивление от проволоки в почве составляет  $r_m = 0,004 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ , температура почвы  $t_{ноч} = 18^\circ\text{C}$ , напряжение питания  $U = 220 \text{ В}$ ,  $\cos\varphi = 0,86$ .

## Решение

Принимаем по справочным данным рабочую температуру проволоки  $t_{np}=275\text{ }^\circ\text{C}$ .

Удельное электрическое сопротивление при  $t_{np}=275\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha\theta) = 0,135 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,0045 \cdot (275 - 18)) = 0,292 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Коэффициент поверхностного эффекта вычисляем по формуле

$$k_n = 1 + 0,0176 \cdot d^{2,2} = 1 + 0,0176 \cdot 3^{2,2} = 1,2.$$

Длину проволоки для нагрева определяем по формуле

$$l_{np} = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot r_m^2}{4\pi \cdot \rho_t \cdot \Delta t^2 \cdot k_n}} = \sqrt[3]{\frac{10^5 \cdot 10 \cdot 220^2 \cdot 0,86^2 \cdot 0,04^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,292 \cdot 10^{-6} \cdot (275 - 18)^2 \cdot 1,2}} = 125 \text{ м}.$$

Если принять, что длина двадцатиграммового парника 21,7 м, то при двух почвенных нагревателях необходимо включить последовательно шесть нагревателей трех парников. Уточненная длина проволоки составит 121 м.

**Задача 4.5.** В непроточном элементном аккумуляционном водонагревателе, предназначенном для удовлетворения потребности в горячей воде коровника на 50 голов, установлено три одинаковых ТЭНа, имеющих условное обозначение по ГОСТ 13268-88: ТЭН-210А13/3,0Р380. ТЭНы соединены в «звезду» и подключены к трехфазной сети с линейным напряжением  $U=380\text{ В}$ . В водонагревателе нагревается  $V=100\text{ л}$  воды от начальной температуры  $t_1=5\text{ }^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t_2=90\text{ }^\circ\text{C}$ , КПД водонагревателя  $\eta_6=0,95$ , удельная теплоемкость воды  $c=4,19\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , а плотность воды  $\delta=1000\text{ кг}/\text{м}^3$ . Сколько времени будет длиться нагрев?

## Решение

При соединении в «звезду» напряжение на каждом ТЭНе равно  $U_\phi=220\text{ В}$ . Номинальное же напряжение ТЭНа, как это следует из его условного обозначения, равно 380 В, а номинальная мощность ТЭНа –  $P_n=3\text{ кВт}$ .

Следовательно, фактическая мощность ТЭНа будет равна:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{U_\phi}{U}\right)^2 = P_n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 3 \cdot \frac{1}{3} = 1\text{ кВт}.$$



Общая мощность водонагревателя:  $P_B = 3 \cdot P = 3 \cdot 1 = 3$  кВт.

Полезный тепловой поток (полезная тепловая мощность) водонагревателя:

$$\Phi_n = P_B \cdot \eta_g = 3 \cdot 0,95 = 2,85 \text{ кВт.}$$

Время нагрева определим из формулы

$$\tau = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\Phi_n} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\Phi_n} = \frac{0,1 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot (90 - 5)}{2850} = 12496 \text{ с} = 3,47 \text{ ч.}$$

**Задача 4.6.** В соответствии с технологическими (зоотехническими) требованиями необходимо подогреть молоко в бидоне перед выпойкой телят. Емкость, в которой нагревают молоко, вмещает  $m = 50$  кг. Начальная температура молока  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , а конечная  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ . Подобрать ТЭНы, которые могли бы быть встроены в крышку бидона в качестве переносного нагревателя. Высота бидона  $h = 0,7$  м, время нагрева  $\tau = 30$  мин, КПД установки  $\eta = 0,85$ . Средняя удельная теплоемкость молока в рассматриваемом диапазоне температур  $c = 3,92$  кДж/(кг·°C).

### Решение

Потребная мощность нагревательного устройства:

$$P = \frac{c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)}{3600 \cdot \eta} = \frac{3,92 \cdot 50 \cdot (30 - 10)}{3600 \cdot 0,5 \cdot 0,85} = 2,56 \text{ кВт.}$$

Для молока допустимая удельная нагрузка ТЭНов (табл. П. 10)  $\Delta P = 2$  Вт/см<sup>2</sup>.

Необходимая активная поверхность нагревателей:

$$F_{акт} = \frac{P}{10 \cdot \Delta P} = \frac{2,56 \cdot 10^3}{10 \cdot 2} = 128 \text{ см}^2 = 0,128 \text{ м}^2.$$

Учитывая размер бидона, по каталожным данным выбираем нагреватели ТЭН-33, имеющие развернутую длину  $l = 1,27$  м и диаметр  $d = 13,5$  мм, активная длина ТЭНа (на 5% меньше развернутой)  $l_{акт} = 1,2$  м.

Активная поверхность ТЭНа равна:

$$F_{1акт} = \pi \cdot d \cdot l_{акт} = 3,14 \cdot 13,5 \cdot 1,2 = 50,868 \text{ см}^2 = 0,051 \text{ м}^2.$$

Необходимое число нагревателей:

$$n = \frac{F_{акт}}{F_{1акт}} = \frac{0,128}{0,051} = 2,51 \approx 3.$$

Принимаем три нагревателя с трубками из нержавеющей стали Х18Н10Т с U-образным исполнением для возможности встраивания в крышку. Так как мощность нагревательного устройства больше 1 кВт, то нагреватель должен быть трехфазным.

**Задача 4.7.** Определить основные электротехнические параметры оребренного ТЭНа и выполнить его теплотехнический расчет при следующих условиях: напряжение питания 380 В, мощность 2,2 кВт, скорость воздуха при обтекании оребренной поверхности 8 м/с. Расположение ТЭНов коридорное. Температура воздуха, обдувающего ТЭН, составляет +15 °С.

### Решение

Задаемся действительной рабочей температурой равной 1100°С. Расчетная температура, по которой выбирается сечение нагревательной проволоки, будет равна:

$$t_{расч} = t_д \cdot k_m \cdot k_c = 1100 \cdot 0,55 \cdot 1,5 = 900 \text{ } ^\circ\text{С},$$

где  $k_m$  – коэффициент монтажа для спирали, помещенной в оребренную трубку, равен 0,5...0,6,  $k_c$  – коэффициент среды для спирали в воздушном потоке принимается в пределах 1,2...1,5 (табл. 4.1, 4.2).

Определяем рабочий ток:

$$I = \frac{P_n}{U_n} = \frac{2200}{380} = 5,8 \text{ А}.$$

По расчетной температуре 900°С и рабочему току 5,8 А (табл. П. 6), выбираем диаметр и сечение нагревательного провода,  $d_{np} = 0,45$  мм, сечением 0,159 мм<sup>2</sup>.

Удельное сопротивление проводника из нихрома при рабочей температуре 1100°С будет равно:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha \cdot (t_{раб} - 20)] = 1,1(1 + 1,65 \cdot 10^{-6} \cdot (1100 - 20)) = 1,102 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

Вследствие очень малого температурного коэффициента удельного электрического сопротивления нихрома его удельное сопротивление ( $\alpha$ ) практически не изменилось.

Требуемая длина проволоки нагревательного элемента ТЭНа будет равна:

$$l_{np} = \frac{U_n^2 \cdot F_{np}}{P_n \cdot \rho_t} = \frac{380^2 \cdot 0,159}{2200 \cdot 1,102} = 9,42 \text{ м}.$$

Средний диаметр витков спирали  $D_{cp}$  принимается равным:

$$D_{cp} = 10 \cdot d_{np} = 10 \cdot 0,45 = 4,5 \text{ мм.}$$

Шаг витков:

$$h = (2 \dots 4) \cdot d_{np} = 2 \cdot 0,45 = 0,9 \text{ мм.}$$

Количество витков спирали:

$$m = \frac{l_{np} \cdot 10^3}{\sqrt{(\pi \cdot D_{cp})^2 + h^2}} = \frac{9,42 \cdot 10^3}{\sqrt{(3,14 \cdot 4,5)^2 + 0,9^2}} = 666.$$

Длина спирали:

$$L_c = m \cdot h = 666 \cdot 0,9 = 599,4 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр трубки:

$$D_n = (2,5 \dots 3) \cdot D_{cp} = 3 \cdot 4,5 = 13,5 \text{ мм.}$$

Полная длина ТЭНа:

$$L_{\text{полн}} = L_c + 2L_n = 599,4 + 2 \cdot 50 = 699 \text{ мм.}$$

Диаметр оребрения  $D_{op}$  будет равен:

$$D_{op} = 2,5 \cdot D_n = 2,6 \cdot 13,5 = 35 \text{ мм.}$$

Шаг ребер будет равен:

$$b = \frac{D_n}{3 \dots 4} = \frac{13,5}{3} = 4,5 \text{ мм.}$$

Высота ребра определяется по следующему выражению:

$$h_p = \frac{D_{op} - D_n}{2} = \frac{35 - 13,5}{2} = 10,8 \text{ мм.}$$

Критерий Рейнольдса будет равен:

$$Re = \frac{v_g \cdot b}{\nu} = \frac{8 \cdot 4,5^{-3}}{18,5 \cdot 10^{-6}} = 1946.$$

Критерий Нуссельта равен:

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot \left(\frac{D_n}{b}\right)^{-0,54} \left(\frac{h_p}{b}\right)^{-0,14} = 0,104 \cdot 1946^{0,72} \cdot \left(\frac{14}{4,5}\right)^{-0,54} \left(\frac{10,8}{4,5}\right)^{-0,14} = 12,25.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{b} = \frac{12,25 \cdot 0,027}{0,0045} = 73,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C.}$$

Число ребер определяется по формуле

$$m_p = \frac{L_c}{b} = \frac{699}{4,5} = 155 \text{ ребер.}$$

Площадь теплоотдающей поверхности ТЭНа равна:  $F_m = F_{op} + F_{mp}$ , а так как площадью  $F_{mp}$  можно пренебречь, так как она обычно составляет не более 3...5% от  $F_{op}$ , то  $F_m \approx F_{op}$ .

Площадь оребрения будет равна:

$$F_{op} = \left( \frac{\pi \cdot D_{op}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} \right) \cdot 2m_p = \left( \frac{3,14 \cdot 0,035^2 - 3,14 \cdot 0,014^2}{4} \right) \cdot 2 \cdot 155 = 0,251 \text{ м}^2.$$

Температура оребрения ТЭНа составит:

$$t_{op} = \frac{P_n + \alpha \cdot F_{op} \cdot t_e}{\alpha \cdot F_{op}} = \frac{2200 + 73,5 \cdot 0,251 \cdot 15}{73,5 \cdot 0,251} = 134,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Удельная поверхностная мощность равна:

$$\Delta P = \frac{P_n}{F_{op}} = \frac{2200}{0,251 \cdot 10^4} = 0,88 \text{ Вт/см}^2.$$

Температура оребрѐнной поверхности ТЭНа не превышает предельно допустимого значения – 200...250 $^\circ\text{C}$ , хотя её и можно повысить за счет уменьшения площади оребрения  $F_{op}$ .

**Задача 4.8.** Определить термическое сопротивление от спирали к наружной поверхности гладкого ТЭНа, геометрические параметры которого следующие: диаметр нагревательного провода  $d_{np} = 0,5$  мм; средний диаметр витков спирали  $D_{cp} = 5,0$  мм; внутренний диаметр трубки ТЭНа  $D_{вн} = 10,0$  мм; наружный диаметр трубки ТЭНа  $D_n = 13,0$  мм; шаг витков  $h = 2,0$  мм. Коэффициент теплопроводности материала наполнителя  $\lambda_1 = 1,5$  Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$ ), материала трубки –  $\lambda_2 = 40$  Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$ ).

### Решение

Термическое сопротивление 1 м наполнителя, м $^\circ\text{C}$ /Вт:

$$r_{m1} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_1} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D_{вн}}{D_{cp}} \right] + 10^{-3} \cdot \left( 0,5 + 0,59 \frac{d_{np}}{D_{cp}} \right) \cdot \left( \frac{h}{d_{np}} - 1 - 6,56 \cdot \left( \frac{d_{np}}{D_{вн}} \right)^{0,38} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{10}{5} \right] + 10^{-3} \cdot \left( 0,5 + 0,59 \frac{0,5}{5,0} \right) \cdot \left( \frac{2,0}{0,5} - 1 - 6,56 \cdot \left( \frac{0,5}{10,0} \right)^{0,38} \right) \right] =$$

$$= 0,111 \text{ (м}^\circ\text{C)/Вт}.$$

Термическое сопротивление 1 м трубки,  $\text{м} \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ :

$$r_{ml2} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_2} \cdot \ln \left[ \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{вн}}} \right] = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40} \cdot \ln \left[ \frac{13,0}{10,0} \right] = 0,104 \cdot 10^{-2} (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}.$$

Общее термическое сопротивление стенки длиной 1 м, ( $\text{м} \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ):

$$r_{ml} = r_{ml1} + r_{ml2} = 0,111 + 0,104 \cdot 10^{-2} = 0,112 (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}.$$

Диаметр эквивалентного цилиндра, м:

$$D_9 = e^{(\ln D_e - 2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 \cdot r_{ml})} = e^{(\ln 10 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 0,112)} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,5 \text{ мм}.$$

Удельное термическое сопротивление тепловому потоку с  $1 \text{ м}^2$  поверхности проволоки, ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ :

$$r_m = r_{ml} \cdot \pi \cdot D_9 \cdot 10^{-3} = 0,112 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 0,123 \cdot 10^{-2} (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}.$$

**Задача 4.9.** Рассмотреть варианты регулирования мощности электрического калорифера. Регулировать мощность электрической нагревательной установки можно, изменяя схему включения нагревателей. Номинальное напряжение нагревателя  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ ; мощность одного нагревателя  $P_{\text{ном}} = 1000 \text{ Вт}$ ; температура окружающего воздуха  $t_o = 20^\circ\text{C}$ . Анализ провести для симметричных и неполнофазных режимов работы трехфазной электротермической установки.

#### Решение

1) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «звезда».

а) При симметричном включении нагревателей по схеме «звезда», каждый нагреватель находится под фазным напряжением  $U_\phi$ . Следовательно, нагреватели включены на напряжение равное

$$U_\phi = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

Так как

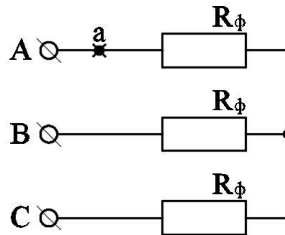
$$P_1 = \frac{U_\phi^2}{R_\phi} = \left( \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_\phi} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{3 \cdot R_\phi},$$

то мощность, выделяемая на нагревательном элементе, получается меньше в 3 раза, чем для схемы с подключением на линейное (номинальное) напряжение. Следовательно, полная мощность для схемы «звезда» равна:

$$P = \frac{P_{ном}}{3} \cdot n = \frac{1000}{3} \cdot 3 = 1000 \text{ Вт.}$$

б) При обрыве линейного или фазного провода в точке «а» (рис. 4.8) в работе оказываются только два нагревателя и включены они на половину линейного напряжения, следовательно, выделяемая ими мощность:

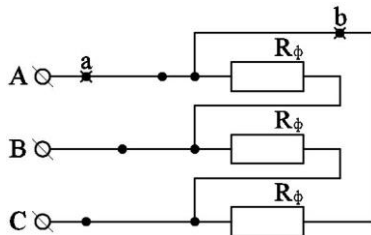
$$P = \frac{P_{ном}}{4} \cdot n = \frac{1000}{4} \cdot 2 = 500 \text{ Вт.}$$



**Рис. 4.8. Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «звезда»**

(на схеме показана предполагаемая точка обрыва проводов «а»)

2) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «треугольник».



**Рис. 4.9. Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «треугольник»**

(на схеме показаны предполагаемые точки обрыва проводов «а» и «б»)

а) При данной схеме включения каждый нагреватель находится под номинальным напряжением, а значит, будет отдавать полную мощность. Данная схема содержит три нагревательных элемента и тогда:

$$P = P_{ном} \cdot n = 1000 \cdot 3 = 3000 \text{ Вт.}$$

б) При обрыве линейного провода в точке «а» (рис. 4.9) под напряжением остаются все три нагревательных элемента, но два из них только под напряжением равным половине номинального. Следовательно, мощность, выделяемая на одном элементе, будет равна:

$$P_1 = \frac{P_{ном}}{4} = \frac{1000}{4} = 250 \text{ Вт.}$$

Полная мощность электрического калорифера в рассматриваемом случае будет равна:

$$P = P_1 \cdot n_1 + n \cdot P_{ном} = 250 \cdot 2 + 1000 \cdot 1 = 1500 \text{ Вт,}$$

где  $n_1$  – количество нагревателей, находящихся не под номинальным напряжением, шт.;  $P_1$  – мощность, отдаваемая нагревателем, находящимся не под номинальным напряжением, Вт.

в) При обрыве фазы в точке «в» (рис. 4.9) получаем, что один нагреватель не включен вообще, а остальные находятся под номинальным напряжением. Следовательно, в работе будет всего два нагревателя:

$$P = n \cdot P_{ном} = 1000 \cdot 2 = 2000 \text{ Вт.}$$

3) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «двойная звезда».

а) При симметричном включении нагревателей по схеме «звезда», каждый нагреватель находится под фазным напряжением  $U_\phi$ . Следовательно, нагреватели включены на напряжение равное

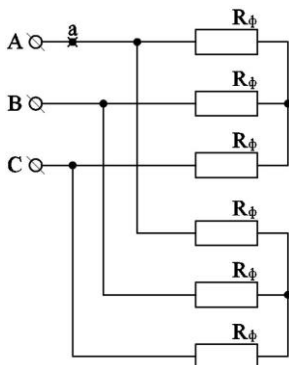
$$U_\phi = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Так как

$$P_1 = \frac{U_\phi^2}{R_\phi} = \left( \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_\phi} = \frac{U_{ном}^2}{3 \cdot R_\phi} = \frac{P_{ном}}{3},$$

то мощность, выделяемая на нагревательном элементе, получается меньше в 3 раза, чем для варианта, когда нагреватель подключен на напряжение  $U_{ном} = U_\Delta$ . Следовательно, полная мощность для этой схемы равна:

$$P = \frac{P_{ном}}{3} \cdot n = \frac{1000}{3} \cdot 6 = 2000 \text{ Вт.}$$



**Рис. 4.10. Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «двойная звезда»**  
(на схеме показана предполагаемая точка обрыва проводов «а»)

б) При обрыве линейного или фазного провода в точке «а» (рис. 4.10) в работе оказываются только четыре нагревателя и включены они на половину линейного напряжения, следовательно, мощность, выделяемая ими, равна:

$$P = \frac{P_{ном}}{4} \cdot n = \frac{1000}{4} \cdot 4 = 1000 \text{ Вт.}$$

4) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «двойной треугольник».

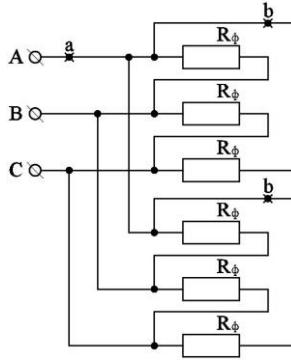
а) Рассмотрим электрокалорифер как симметричную трехфазную нагрузку соединенную по схеме «двойной симметричный треугольник». При данной схеме включения каждый электрический нагреватель находится под номинальным напряжением, а значит будет отдавать полную мощность. Так как двойной треугольник содержит шесть нагревательных элементов, то общая мощность электрического калорифера равна:

$$P = 6 \cdot P_{ном} = 6 \cdot 1000 = 6000 \text{ Вт.}$$

б) При обрыве линейного провода в точке «а» (рис. 4.11) под напряжением остаются все шесть нагревательных элементов, но четыре из них только под напряжением, равным половине номинального. Следовательно, мощность, выделяемая на одном элементе, получается равна:

$$P_1 = \frac{P_{ном}}{4} = \frac{1000}{4} = 250 \text{ Вт.}$$





**Рис. 4.11. Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «двойной треугольник»**  
(на схеме показаны предполагаемые точки обрыва проводов «а» и «b»)

Полная мощность электрического калорифера в рассматриваемом случае будет равна:

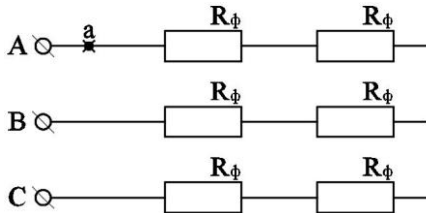
$$P = P_1 \cdot n_1 + n \cdot P_{ном} = 250 \cdot 4 + 1000 \cdot 2 = 3000 \text{ Вт},$$

где  $n_1$  – количество нагревателей, находящихся не под номинальным напряжением, шт.;  $P_1$  – мощность, отдаваемая нагревателем, находящимся не под номинальным напряжением, Вт.

в) При обрыве фазы в точках «b» (рис. 4.11) получаем, что два нагревателя не включены вообще, а остальные находятся под номинальным напряжением. Следовательно, всего в работе будет четыре нагревателя, тогда полная мощность электрического калорифера в рассматриваемом случае будет равна:

$$P = P_{ном} \cdot n = 1000 \cdot 4 = 4000 \text{ Вт}.$$

5) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «последовательная звезда».



**Рис. 4.12. Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «последовательная звезда»**  
(на схеме показана предполагаемая точка обрыва проводов «а»)

а) При включении нагревателей по такой схеме каждый нагреватель находится под напряжением равным половине  $U_{\phi}$ , а следовательно, мощность на каждом нагревателе уменьшается в  $\frac{P_{ном}}{12}$  раза. Полная мощность нагревателя, включенного по такой схеме, можно вычислить по формуле

$$P = \frac{P_{ном}}{12} \cdot n = \frac{1000}{12} \cdot 6 = 500 \text{ Вт.}$$

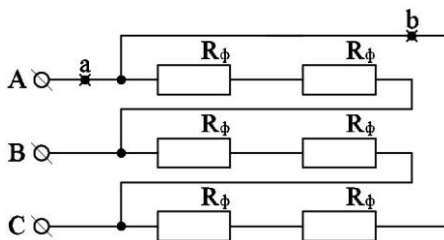
б) При обрыве линейного или фазного провода в точке «а» (рис. 4.12) в работе оказываются только четыре нагревателя и включены они на четверть линейного напряжения, согласно зависимости мощности, выделяемой на нагревательном элементе, от подводимого напряжения получаем:

$$P = \frac{P_{ном}}{16} \cdot n = \frac{1000}{16} \cdot 4 = 250 \text{ Вт.}$$

б) Рассмотрим схему соединения нагревательных элементов (ТЭНов) – «последовательный треугольник».

а) При включении нагревателей по такой схеме каждый нагреватель находится под напряжением равным половине номинального, а следовательно, мощность на каждом нагревателе уменьшается в четыре раза. Полная мощность нагревателя, включенного по такой схеме равна:

$$P = \frac{P_{ном}}{4} \cdot n = \frac{1000}{4} \cdot 6 = 1500 \text{ Вт.}$$



**Рис. 4.13.** Схема соединения электрических нагревателей (ТЭНов) в электрокалорифере «последовательный треугольник» (на схеме показаны предполагаемые точки обрыва проводов «а» и «b»)

б) При обрыве линейного провода в точке «а» (рис. 4.13) получается, что четыре нагревателя включены на четвертую часть

номинального напряжения, а два – на половину. Мощность, отдаваемая в этом случае, вычисляется по формуле

$$P = \frac{P_{ном}}{16} \cdot n + \frac{P_{ном}}{4} \cdot n = \frac{1000}{16} \cdot 4 + \frac{P_{ном}}{4} \cdot 2 = 750 \text{ Вт.}$$

в) При обрыве фазы в точке «в» (рис. 4.13) два нагревателя не участвуют в работе, а следовательно, в работе участвуют только четыре нагревателя включенных на половинное напряжение. Полная мощность в этом случае равна:

$$P = \frac{P_{ном}}{4} \cdot n = \frac{1000}{4} \cdot 4 = 1000 \text{ Вт.}$$

Для сравнения все полученные результаты расчетов по определению мощности электротермической установки при различных схемах включения нагревательных элементов и режимов работы сведем в таблицу 4.5.

Таблица 4.5

**Сводная таблица выполненных расчетов по определению мощности электротермической установки при различных схемах включения нагревательных элементов и режимов работы**

Схема включения нагревателей	Симметричная трехфазная нагрузка		Обрыв линейного провода		Обрыв фазы	
	кол-во нагревателей в работе	P, кВт	кол-во нагревателей в работе	P, кВт	кол-во нагревателей в работе	P, кВт
Двойной треугольник	6	6,0	6	3,0	4	4,0
Звезда	3	1,0	2	0,5	2	0,5
Треугольник	3	3,0	3	1,5	2	2,0
Двойная звезда	6	2,0	4	1,0	4	1,0
Последовательный треугольник	6	1,5	6	0,75	4	1,0
Последовательная звезда	6	0,5	4	0,25	4	0,25

**Контрольные задания**

1. Рассчитать электрокалориферную установку с вентилятором для сушки одежды в неотапливаемом помещении,  $t_o = 8^\circ\text{C}$  – температура воздуха в помещении. Температура воздуха, выходящего из калорифера, должна быть равна  $t_{вых} = 60^\circ\text{C}$ . Подача вентилятора  $L = 0,09 \text{ м}^3/\text{с}$ . Провод нихромовый марки Х20Н80. Объемная теплоемкость воздуха

$c = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$ . Номинальное напряжение нагревателя  $U_n = 220 \text{ В}$ . Установка однофазная.

2. Рассчитать электрический нагреватель из нихромового провода для подогрева воздуха, поступающего в комнату через форточку, с тем, чтобы этот воздух имел комнатную температуру  $t_{\text{вн}} = 24^\circ\text{С}$  при наружной температуре  $t_{\text{нар}} = -12^\circ\text{С}$ . Кратность воздухообмена  $k_v = 2 \text{ ч}^{-1}$  при объеме комнаты  $V = 40 \text{ м}^3$ . Нагреватель однофазный, напряжение сети  $U = 220 \text{ В}$ . Расчёт вести по таблицам нагрузок. Рабочая температура нагревателя  $t_{\text{раб}} = 600^\circ\text{С}$ . Коэффициенты монтажа и среды  $k_m = 0,5$ ;  $k_c = 1,6$ .

3. Рассчитать электрический сушильный шкаф мощностью  $P_n = 2,4 \text{ кВт}$ , на напряжение  $U_n = 220 \text{ В}$ . Требуемая температура нагрева воздуха  $t_\theta = 140^\circ\text{С}$ . Коэффициент теплоотдачи с поверхности  $\alpha$  зависит от скорости движения воздуха  $\alpha = \alpha_{\text{ст}}(v/v_{\text{см}})$ , где  $v$  – скорость движения воздуха, м/с;  $\alpha_{\text{см}} = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  – коэффициент теплоотдачи при стандартной скорости  $v_{\text{см}} = 6 \text{ м/с}$ ,  $t_p = 700^\circ\text{С}$  – рабочая температура нагревателя. Расчет выполнить аналитическим методом. Допустимая температура нагрева для материала нагревательного элемента  $t_{\text{дон}} = 1200^\circ\text{С}$ ; материал – нихром Х20Н80. Нагреватель трехфазный.

4. Рассчитать нагревательное устройство для предотвращения замерзания водопровода, установленного на открытой площадке, при температуре наружного воздуха  $t_{\text{нар}} = -25^\circ\text{С}$ . Нагреватель должен быть выполнен из нагревательного провода в виде однослойной бифилярной обмотки, наматываемой на трубу в зоне промерзания, длиной  $l = 1,5 \text{ м}$  и с защитой слоями тепло- и гидроизоляции, а также кожухом из жести для защиты от механических повреждений. Диаметр теплоотдающей поверхности  $D = 3 \cdot d$ , где  $d = 0,08 \text{ м}$  – диаметр трубы. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Температура воды в трубе  $t = 6^\circ\text{С}$ . Как изменится мощность и другие параметры, если обмотка будет выполнена не бифилярной? Напряжение питания устройства  $U = 220 \text{ В}$ . Для расчета использовать нагревательный провод типа ПОСХВ.

5. Выбрать трубчатые нагреватели для элементного водоподогревателя, который обеспечивает теплой и горячей водой технологические нужды молочной фермы. Объем бака  $V = 200 \text{ л}$ . Продолжительность нагрева  $\tau = 4 \text{ ч}$ . Нагрузка должна быть равномерно распределена по фазам. Проверить возможность размещения выбранных нагревателей в объеме бака. Питающее напряжение сети  $380/220 \text{ В}$ .

6. Определить основные электротехнические параметры оребренного ТЭНа и выполнить его теплотехнический расчет при следующих условиях: напряжение питания  $380 \text{ В}$ , мощность  $2,5 \text{ кВт}$ , скорость воздуха при обтекании оребренной поверхности  $8 \text{ м/с}$ . Расположение ТЭНов коридорное. Температура воздуха, обдувающего ТЭН, составляет плюс  $12^\circ\text{С}$ .

7. В электронагревательной установке имеется шесть нагревательных элементов сопротивления. Мощность каждого нагревателя  $P_l = 1 \text{ кВт}$ , ко-

торые подключаются на напряжение 220 В. Определить, какую мощность будет потреблять установка при соединении нагревателей в «последовательную» и «параллельную звезду», «последовательный» и «параллельный треугольник». Напряжение сети 380/220 В.

8. Выбрать ТЭНы для подогрева от 10 до 30°C молока перед выпойкой телят объемом  $V = 100$  л за  $\tau = 30$  мин. Допустимая удельная поверхностная мощность ТЭНов для подогрева молока 2 Вт/см<sup>2</sup>.

9. Определить термическое сопротивление от спирали к наружной поверхности гладкого ТЭНа, геометрические параметры которого следующие: диаметр нагревательного провода  $d_{np} = 0,75$  мм; средний диаметр витков спирали  $D_{cp} = 5,0$  мм; внутренний диаметр трубки ТЭНа  $D_{вн} = 13,0$  мм; наружный диаметр трубки ТЭНа  $D_{н} = 15,0$  мм; шаг витков  $h = 2,5$  мм. Коэффициент теплопроводности материала наполнителя  $\lambda_1 = 1,5$  Вт/(м·°С), материала трубки –  $\lambda_2 = 30$  Вт/(м·°С).

### Контрольные вопросы

1. Поясните устройство ТЭНа.
2. Какие материалы применяются для изготовления спиралей нагревателей?
3. Перечислите требования, предъявляемые к материалам для нагревателей.
4. Дайте понятие расчетной и действительной температур.
5. Что такое коэффициенты монтажа и среды, каков их физический смысл?
6. Назначение оребрения ТЭНов.
7. Требования к температурному режиму поверхности оребрения.
8. Что такое коэффициент теплоотдачи поверхности ТЭНа?
9. Как расчетным путем определить температуру поверхности ТЭНов?
10. Способы регулирования мощности элементных нагревательных устройств.
11. Как влияет питающее напряжение на мощность ТЭНа?
12. Какой материал используют для наполнения ТЭНов, назовите требования, предъявляемые к наполнителям?

## **5. Расчет вентиляции и отопления в животноводческих и птицеводческих помещениях**

### **5.1. Общие положения и сведения из теории вентиляции и отопления в животноводческих и птицеводческих помещениях**

Микроклимат закрытых помещений, прежде всего, характеризуется совокупностью основных физических и химических факторов их воздушной среды, которые комплексно воздействуют на живые организмы. Наибольшее влияние на жизнедеятельность человека и животных оказывают такие факторы как температурно-влажностный режим, скорость движения и состав воздуха, а также освещенность и степень ионизации воздуха.

Воздухообмен в животноводческих помещениях может осуществляться как с помощью естественной, так и принудительной вентиляции.

Естественная вентиляция осуществляется за счет разности давления наружного воздуха и воздуха внутри помещения, а также энергии ветровых потоков. Простейшей системой естественной вентиляции является шахтная вентиляция. Она работает по принципу удаления воздуха из верхней зоны производственных сооружений через утепленные шахты, заделанные в чердачные перекрытия, и одновременной подачи свежего воздуха через подоконные или надоконные щели.

Удаление загрязненного выделениями животных и птицы внутреннего воздуха с помощью естественной вентиляции в большинстве случаев не позволяет обеспечить требуемый по зоотехническим нормам газовый состав воздуха внутри животноводческих помещений, поэтому применяют принудительную вентиляцию.

Принудительные системы вентиляции подразделяют на вытяжные, приточные и приточно-вытяжные, которые технически реализуется при помощи вентиляторов.

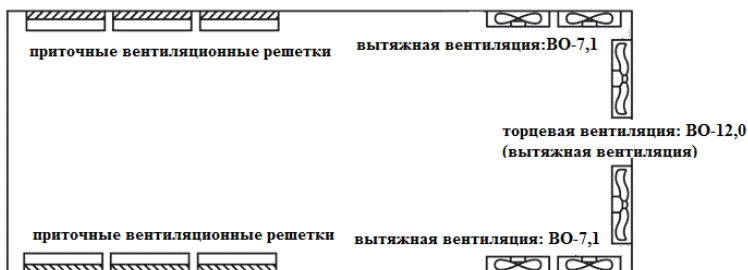
Вытяжные системы вентиляции оборудуются вытяжными вентиляторами на одной стороне помещения и воздухозаборными проемами с другой стороны или под крышей.



**а**



**б**



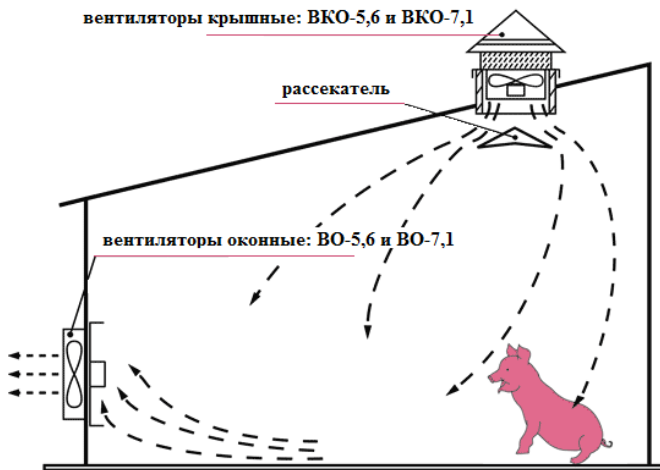
**в**

**Рис. 5.1. Схемы организации систем вентиляции в птичниках:**

а – типовая схема вентиляции; б – схема вентиляции с увеличенным воздухообменом; в – схема туннельной вентиляции

Приточная принудительная вентиляция, как правило, осуществляется при помощи центробежных вентиляторов. Удаление

загрязненного воздуха осуществляется чаще всего через специально устраиваемые для этой цели проемы и отверстия – в местах наибольшей концентрации вредных примесей, в частности, в верхней зоне помещений (шахты, фонари, щели). Причем, при расчете предусматривают превышение притока воздуха над оттоком в размерах 10-20% для того, чтобы создаваемый таким образом подпор воздуха предохранял помещение от проникновения инородных частиц и болезнетворных микроорганизмов из соседних помещений. Особенно ответственно такие меры безопасности необходимо предусматривать в помещениях для телят, супоросных маток с поросятами-сосунами и для порослят-отъемышей.



**Рис. 5.2. Принцип организации системы вентиляции свинарника, позволяющий обеспечить качественный воздухообмен, при котором вредные вещества, содержащиеся в воздухе, удаляются достаточно быстро, а свежий воздух регулярно поступает в помещение**

Приточные системы вентиляции, по сравнению с вытяжными, имеют целый ряд преимуществ:

- 1) поступающий воздух более равномерно распределяется по внутреннему объему помещения;
- 2) исключается влияние ветра;
- 3) поступающий воздух может быть предварительно прогрет, очищен от пыли, обеззаражен и т.д.



## 5.2. Расчет системы вентиляции помещения для содержания животных или птицы

Расчет объема приточного воздуха  $L_{расч}$ , м<sup>3</sup>/ч, определяется из условия растворения углекислоты до допустимой концентрации и предельно допустимого содержания водяных паров. В этом случае происходит удаление и других вредных примесей (аммиак, сероводород, пыль), выделяющихся в помещениях в значительно меньших количествах.

Количество приточного воздуха  $L_{co_2}$ , м<sup>3</sup>/ч, необходимого для понижения концентрации углекислоты, вычисляется по формуле

$$L_{co_2} = \frac{\sum_{i=1}^k c_i \cdot n_i}{c_1 - c_2}, \quad (5.1)$$

где  $c_i$  – количество CO<sub>2</sub>, выделяемое одним животным или птицей данного вида, л/ч (табл. П. 11);  $n_i$  – количество животных данного вида в помещении;  $k$  – число видов животных;  $c_1$  – предельно допустимая концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе помещения, л/м<sup>3</sup> (табл. П. 13);  $c_2$  – концентрация CO<sub>2</sub> в наружном воздухе ( $c_2=0,3...0,4$  л/м<sup>3</sup>).

Количество приточного воздуха  $L_w$ , м<sup>3</sup>/ч, необходимого для растворения водяных паров, определяется по формуле

$$L_w = \frac{W}{(d_{вн} - d_n) \cdot \delta}, \quad (5.2)$$

где  $W$  – суммарные влаговыделения в помещении, г/ч;  $d_{вн}$  – влагосодержание воздуха в помещении, г/кг;  $d_n$  – влагосодержание наружного воздуха, г/кг;  $\delta$  – плотность воздуха при температуре помещения, кг/м<sup>3</sup> (табл. П. 16).

Значения  $d_{вн}$  и  $d_n$  определяются по i-d диаграмме для влажного воздуха с учетом относительной влажности наружного воздуха  $\varphi_n=85-90\%$  и внутри помещения. Поскольку при низких отрицательных температурах  $d_n$  по i-d диаграмме определить затруднительно, то можно пользоваться для определения  $L_w$  следующей формулой

$$L_w = \frac{W}{d_{вн} \cdot \delta_{вн} \cdot \varphi_{вн} - d_n \cdot \delta_n \cdot \varphi_n}, \quad (5.3)$$

где  $\delta_{вн}$ ,  $\delta_n$  – соответственно плотность внутреннего и наружного воздуха при соответствующей температуре;  $\varphi_{вн}$ ,  $\varphi_n$  – соответственно относительная влажность внутреннего и наружного воздуха.

Влагосодержание воздуха  $d$  и его плотность  $\delta$  можно определить по таблице П. 16.

Общее выделение влаги в помещении для животных подсчитывается по формуле

$$W = \xi \sum_{i=1}^k w_i \cdot n_i, \quad (5.4)$$

где  $w_i$  – выделение влаги одним животным данного вида, г/ч (табл. П. 11);  $n_i$  – количество животных данного вида в помещении;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий испарение влаги с мокрых поверхностей помещения (для коровников и телятников  $\xi=1,07\dots1,25$ ; для свинарников  $\xi=1,09\dots1,3$ ; большие значения  $\xi$  относятся к помещениям с недостаточным количеством или полным отсутствием подстилки при неудовлетворительной работе канализации).

Если температура внутри помещения отличается от табличной (табл. П. 11), то при определении  $w_i$  необходимо ввести поправочный коэффициент (табл. П. 12).

Влаговыделение в птичнике:

$$W = W_{nm} + W_{ном}, \quad (5.5)$$

где  $W_{nm}$  – количество водяных паров, выделяемых птицами;  $W_{ном}$  – количество влаги, испаряющейся из помета.

Количество водяных паров и влаги определяется по нижеприведенным формулам:

$$W_{nm} = \sum_{i=1}^k w_i \cdot n_i, \quad (5.6)$$

$$W_{ном} = \frac{0,7 \sum P_{ном} \cdot n_i}{24}, \quad (5.7)$$

где  $w_i$  – выделение влаги одной птицей данного вида, г/ч; (табл. П. 13) с учетом внутренней температуры и массы птицы;  $n_i$  – количество птиц данного вида в помещении;  $P_{ном}$  – среднесуточный выход помета от одной птицы (см. табл. Приложение 15);  $0,7$  – коэффициент, учитывающий усушку помета.

Если температура внутри помещения отличается от табличной (табл. П. 13), то при определении  $w_i$  необходимо ввести поправочный коэффициент (табл. П. 14).

Необходимый воздухообмен  $L_{расч}$ , м<sup>3</sup>/ч, принимается по наибольшей из двух величин  $L_{co2}$  или  $L_W$ .

Правильность расчета проверяют по кратности воздухообмена:

$$k_e = \frac{L_{расч}}{V_n}, \quad (5.8)$$

где  $V_n$  – внутренний объем помещения, м<sup>3</sup>.

В животноводческих фермах для холодного периода года значение кратности воздухообмена равно  $k_e = 3 \dots 6$  ч<sup>-1</sup>, а в птичниках  $k_e = 9 \dots 13$  ч<sup>-1</sup>.

Площадь сечения  $F$ , м<sup>2</sup>, всех вытяжных шахт при естественной тяге определяется по формуле

$$F = \frac{L_{расч}}{3600 \cdot v}, \quad (5.9)$$

где  $v$  – скорость движения воздуха в вытяжной шахте помещения, м/с.

Скорость воздуха определяется как

$$v = 2,2 \sqrt{\frac{h \cdot (t_{вн} - t_n)}{273}}, \quad (5.10)$$

где  $h$  – высота вытяжной шахты, м,  $h = 2 \dots 10$  м;  $t_{вн}$  – расчетная температура внутри помещения, °С;  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха, °С.

Число вытяжных шахт:

$$n_{в.ш} = \frac{F}{f}, \quad (5.11)$$

где  $f$  – живое сечение одной шахты, м<sup>2</sup> (в типовых проектах животноводческих помещений обычно принимаются вытяжные шахты квадратного сечения со стороной квадрата 400, 500, 600, 700 мм или прямоугольного сечения).

Подача вентилятора  $L_v$  (м<sup>3</sup>/ч) принимается по значению расчетного воздухообмена с учетом поправочного коэффициента на подсос воздуха в воздуховодах: при стальных, пластмассовых и асбоцементных воздухопроводах длиной 50 м – 1,1; в остальных случаях – 1,15:

$$L_v = (1,1 \dots 1,15) \cdot L_{расч}. \quad (5.12)$$

Число вентиляторов определяется из условия, что подача одного вентилятора, во избежание повышенного уровня шума, не

должна превышать 8000 м<sup>3</sup>/ч, а также с учетом предпочтительной схемы отопления и вентиляции.

### 5.3. Расчет системы отопления помещения для содержания животных или птицы

Микроклимат в животноводческом помещении зависит от его теплоизоляции, воздухообмена, температуры наружного воздуха и количества теплоты, выделяемой животными. В тех случаях, когда в зимнее время тепловые потери через ограждения и вентиляцию не компенсируются тепловыделениями животных или птиц, помещения необходимо оборудовать системами отопления.

Необходимый для отопления животноводческих помещений тепловой поток  $\Phi_{от}$ , Вт, можно определить на основании уравнения теплового баланса:

$$\Phi_{от} = \Phi_{огр} + \Phi_{в} + \Phi_{сл} + \Phi_{доп} - \Phi_{жс} - \Phi_{э}, \quad (5.13)$$

где  $\Phi_{огр}$  – тепловой поток через ограждение, Вт;  $\Phi_{в}$  – потери теплоты на вентиляцию, Вт;  $\Phi_{сл}$  – случайные потери теплоты, обычно принимаются в пределах 10...15% от  $\Phi_{огр} + \Phi_{в}$ , Вт;  $\Phi_{доп}$  – дополнительные потери теплоты в зависимости от ориентации стен к сторонам света, как правило, дополнительные потери принимают в пределах 10...15% от половины потерь через стены, окна, двери, Вт;  $\Phi_{жс}$  – поток свободной теплоты, выделяемой животными или птицей, Вт;  $\Phi_{э}$  – тепловые потоки от средств местного электрообогрева, двигателей электроприводов и электрических ламп, Вт.

Тепловые потери через все наружные ограждения  $\Phi_{огр}$ , Вт, определяются по формуле

$$\Phi_{огр} = \frac{1}{R_{мо}} F \cdot (t_{вн} - t_{н}) \cdot n, \quad (5.14)$$

где  $R_{мо}$  – сопротивление теплопередаче ограждения, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $F$  – площадь поверхности ограждения, м<sup>2</sup>;  $t_{вн}$ ,  $t_{нар}$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно, °С;  $n$  – поправочный коэффициент (для наружных стен и полов на грунте  $n = 1$ ; для чердачных перекрытий с различными видами кровли  $n = 0,75...0,9$ ; для ограждений, отделяющих отапливаемые помещения от неотапливаемых  $n = 0,4...0,7$ ; для перекрытий над подпольями  $n = 0,4...0,75$ ).

Сопротивление  $m$ -слойного ограждения теплопередаче  $R_{то}$ , (м·°С)/Вт, равно:

$$R_{то} = R_{твн} + \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_i}{\lambda_i} + R_{тн}, \quad (5.15)$$

где  $R_{твн}$  – термическое сопротивление тепловосприятию внутренней поверхности ограждения, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (табл. П. 17);  $\Delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя ограждения, м;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя ограждения, Вт/(м·°С) (табл. П. 1);  $R_{тн}$  – термическое сопротивление теплопередаче наружной поверхности ограждения, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (табл. П. 18).

Виды и конструкции ограждений определяются по паспорту проекта помещений.

Потери теплоты через неутепленные полы определяют по зонам шириной 2 м, параллельным наружным стенам. Сопротивление теплопередаче неутепленных полов  $R_{мин}$  для зоны, расположенной непосредственно у стены, составляет 2,15; для второй – 4,3; для третьей – 8,6; для остальной площади пола – 14,2 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Для утепленных полов сопротивление теплопередаче  $R_{мын}$ , (м·°С)/Вт, определяется по формуле

$$R_{мын} = R_{мин} + \frac{\Delta_{yc}}{\lambda_{yc}} + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta_i}{\lambda_i}, \quad (5.16)$$

где  $\Delta_{yc}$  – толщина утепляющего слоя, м;  $\lambda_{yc}$  – коэффициент теплопроводности утепляющего слоя, Вт/(м·°С);  $d_i$ ,  $\Delta_i$  – толщина и коэффициент теплопроводности остальных слоев пола, м и Вт/(м·°С).

В том случае, когда коэффициенты теплопроводности материалов, из которых состоят полы,  $\lambda \geq 1,16$  Вт/(м·°С), то полы на грунте считаются неутепленными.

Кроме того, необходимо учитывать дополнительные потери теплоты через строительные ограждения, которые определяются ориентацией здания по отношению к сторонам света, господствующими направлениями ветра и т.д. Стенам, обращенным на север, восток, северо-восток и северо-запад, присущи дополнительные потери теплоты в размере 10%, а обращенным на юго-восток и запад, в размере 5% от основных теплопотерь. Для зданий, построенных на возвышенности, открыто делают 10% надбавку на теплопотери через все ограждения.

Тепловой поток  $\Phi_6$ , Вт, необходимый для подогрева приточного воздуха, равен:

$$\Phi_{\delta} = \frac{L_{расч} \cdot \delta \cdot c \cdot (t_{вн} - t_{н})}{3600}, \quad (5.17)$$

где  $L_{расч}$  – расчетный воздухообмен помещения, м<sup>3</sup>/ч;  $\delta$  – плотность наружного воздуха при соответствующей температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°С).

Поток свободной теплоты  $\Phi_{жс}$ , Вт, выделяемой животными:

$$\Phi_{жс} = \sum_{i=1}^k q_i \cdot n_i, \quad (5.18)$$

где  $q_i$  – тепловой поток, выделяемый одним животным данного вида, Вт (табл. П. 11);  $n_i$  – количество животных данного вида в помещении.

Если температура, при которой содержатся животные, отличается от температуры, при которой осуществлялись замеры выделений животными, то необходимо вносить поправочный коэффициент (табл. П. 12).

Для птицеводческого помещения тепловую производительность системы отопления  $\Phi_{от}$ , Вт, определяют из уравнения теплового баланса:

$$\Phi_{от} = \Phi_{опр} + \Phi_{\delta} + \Phi_{сн} + \Phi_{дон} + \Phi_{ном} - \Phi_{нт} - \Phi_{\varepsilon}, \quad (5.19)$$

где  $\Phi_{ном}$  – тепловой поток на испарение влаги из помета, Вт.

Тепловой поток на испарение влаги из помета  $\Phi_{ном}$ , Вт, определяется по формуле

$$\Phi_{ном} = 0,276 \cdot 2,49 \cdot W_{ном} = 0,692 \cdot W_{ном}, \quad (5.20)$$

где  $W_{ном}$  – количество влаги, испаряющейся из помета, г/ч; 2,49 – скрытая теплота испарения воды, кДж/г.

Поток свободной теплоты  $\Phi_{нт}$ , Вт, выделяемой птицами:

$$\Phi_{нт} = 0,6 \sum_{i=1}^k q_i \cdot n_i, \quad (5.21)$$

где  $q_i$  – тепловой поток, выделяемый одной птицей данного вида (табл. П. 13), Вт; 0,6 – коэффициент, учитывающий тепловыделение от птиц в ночное время.

Если температура, при которой содержится птица, отличается от табличной (табл. П. 13), то необходимо ввести поправочный коэффициент (табл. П. 14). Необходимо обратить внимание на то, что в таблице П. 13 приводятся данные о выделении теплоты, углекислоты и водяных паров не на одну голову, а на 1 кг живой массы птицы и указывается масса птицы.

## 5.4. Расчет электрокалориферной установки

### 5.4.1. Тепловой расчет нагревательных элементов

В качестве нагревательных элементов в электрических калориферах используют трубчатые электронагреватели (ТЭНы), смонтированные в единый конструктивный блок.

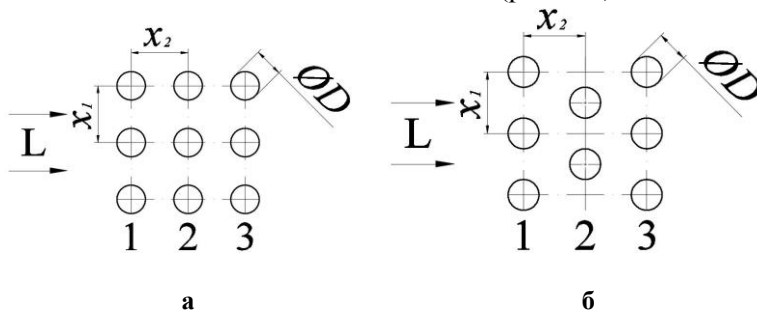
В задачу теплового расчёта блока ТЭНов входит определение количества ТЭНов в блоке и действительной температуры поверхности нагревательного элемента. Результаты теплового расчёта используют для уточнения конструктивных параметров блока.

Мощность одного ТЭНа определяют исходя из мощности калорифера  $P_{эку}$  и числа ТЭНов  $z$ , установленных в калорифере:

$$P_m = \frac{P_{эку}}{z}. \quad (5.22)$$

Число ТЭНов  $z$  принимают кратным 3, причем мощность одного ТЭНа не должна превышать 3...4 кВт. ТЭН подбирают по паспортным данным (табл. П. 8).

По конструктивному исполнению различают блоки с коридорной и шахматной компоновкой ТЭНов (рис. 5.3).



**Рис. 5.3. Схемы компоновки блока ТЭНов:**

а – коридорная компоновка; б – шахматная компоновка

Для первого ряда нагревателей скомпонованного нагревательного блока должно выполняться условие:

$$t_m^1 = \frac{P_m^1}{0,6 \cdot \alpha_{ср} \cdot F_m^1} + t_g < 180^\circ\text{C}, \quad (5.23)$$

где  $t_m^1$  – действительная средняя температура поверхности нагревателей первого ряда, °С;  $P_m^1$  – суммарная мощность нагревателей первого ряда, Вт;  $\alpha_{cp}$  – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_m^1$  – суммарная площадь теплоотдающей поверхности нагревателей первого ряда, м<sup>2</sup>;  $t_{в}$  – температура воздушного потока после калорифера, °С.

Суммарную мощность и суммарную площадь нагревателей первого ряда определяют из параметров выбранных ТЭНов по формулам:

$$P_m^1 = kP_m, F_m^1 = kF_m, \quad (5.24)$$

где  $k$  – количество ТЭНов в ряду, шт;  $P_m, F_m$  – соответственно мощность, Вт, и площадь поверхности, м<sup>2</sup>, одного ТЭНа.

Площадь поверхности оребренного ТЭНа, м<sup>2</sup>:

$$F_m = \pi \cdot l_a \cdot \left( D_n + \frac{h_p \cdot (D_n + h_p)}{b} \right), \quad (5.25)$$

где  $D_n$  – диаметр ТЭНа, м;  $l_a$  – активная длина ТЭНа, м;  $h_p$  – высота ребра, м;  $b$  – шаг оребрения, м.

Для пучков поперечно обтекаемых труб следует учитывать средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{cp}$ , так как условия передачи теплоты отдельными рядами нагревателей различны и определяются турбулизацией воздушного потока. Теплоотдача первого и второго рядов трубок по сравнению с третьим рядом меньше. Так, если теплоотдачу третьего ряда ТЭНов принять за единицу, то теплоотдача первого ряда составит около 0,6, второго – около 0,7 в шахматных пучках и около 0,9 – в коридорных от теплоотдачи третьего ряда. Для всех рядов после третьего коэффициент теплоотдачи можно считать неизменным и равным теплоотдаче третьего ряда.

Коэффициент теплоотдачи ТЭНа определяют по эмпирическому выражению, Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}, \quad (5.26)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С),  $\lambda = 0,027$  Вт/(м·°С);  $D$  – диаметр ТЭНа, м.

Критерий Нуссельта для конкретных условий теплообмена рассчитывают по выражениям:

- 1) для коридорных пучков труб:
  - при  $Re \leq 1 \cdot 10^3$



$$Nu = 0,49Re^{0,5}, \quad (5.27)$$

– при  $Re > 1 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,149Re^{0,65}, \quad (5.28)$$

2) для шахматных пучков труб:

– при  $Re \leq 1 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,49Re^{0,5}, \quad (5.29)$$

– при  $Re > 1 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,35Re^{0,6}, \quad (5.30)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса характеризует режим обтекания ТЭНов воздушным потоком и равен:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.31)$$

где  $v$  – скорость воздушного потока, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $m^2/c$ ,  $\nu = 18,5 \cdot 10^{-6} m^2/c$ .

Для обеспечения эффективной термической нагрузки ТЭНов, не приводящей к перегреву нагревателей, следует обеспечивать в зоне теплообмена движение потока воздуха со скоростью не менее 6 м/с. Учитывая возрастание аэродинамического сопротивления конструкции воздушного канала и нагревательного блока с ростом скорости потока воздуха, последнюю следует ограничить значением 15 м/с.

Средний коэффициент теплоотдачи:

1) для коридорных пучков:

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha \cdot (n - 0,5)}{n}, \quad (5.32)$$

2) для шахматных пучков:

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha \cdot (n - 0,7)}{n}, \quad (5.33)$$

где  $n$  – количество рядов труб (ТЭНов) в пучке нагревательного блока.

Температура воздушного потока  $t_g$  после калорифера равна, °С:

$$t_g = \frac{P_{эку}}{\delta \cdot c \cdot L_g}, \quad (5.34)$$

где  $P_{эку}$  – суммарная мощность ТЭНов калорифера, кВт;  $\delta$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость воздуха,  $кДж/(кг \cdot °С)$ ,  $c = 1 кДж/(кг \cdot °С)$ ;  $L_g$  – производительность калорифера,  $м^3/с$ .

Если условие (5.23) не выполняется, выбирают другой нагревательный элемент или изменяют принятые в расчете скорость воздуха, компоновку нагревательного блока.

#### 5.4.2. Конструктивный расчет нагревательного блока

В расчет конструктивных параметров блока ТЭНов входит определение расстояний между нагревателями в ряду  $x_1$  и расстояний между рядами  $x_2$  (рис. 5.1), а также внешних размеров блока. При расчете конструктивных элементов следует учитывать принятую ранее скорость воздушного потока, количество нагревателей в ряду, количество рядов, расположение нагревателей и производительность вентилятора  $L_6$ .

Для расчета  $x_1$ , определяют «живое» сечение блока нагревателей, т. е. не занятую ТЭНами площадь воздушного канала  $F_k$ , м<sup>2</sup>:

$$F_k = \frac{L_6}{v}, \quad (5.35)$$

где  $L_6$  – производительность калорифера, м<sup>3</sup>/с;  $v$  – принятая в тепловом расчете скорость воздуха, м/с.

Минимальные размеры нагревательного блока определяют по следующим выражениям:

1) расстояние между нагревателями в ряду  $x_1$ , м:

$$x_1 = \frac{F_k}{(k+1) \cdot l_a} + D, \quad (5.36)$$

где  $k$  – количество ТЭНов в ряду;

2) расстояние между рядами нагревателей  $x_2$ , м:

при

$$x_1 \geq 3/2D \quad x_2 = x_1, \quad (5.37)$$

при

$$x_1 < 3/2D \quad x_2 = 1,2 x_1,$$

где  $D$  – диаметр выбранного ТЭНа (ТЭНа с оребрением), м;

3) высота  $H$  и ширина  $B$  блока нагревателей, м:

$$H = (k+1) \cdot x_1, \quad (5.38)$$

$$B_{н} = l + 0,1, \quad (5.39)$$

где  $l$  – полная длина ТЭНа, м;

4) глубина блока нагревателей  $C_n$ , м:

$$C_n = (n + 1)x_2. \quad (5.40)$$

По результатам расчета нагревательного блока рекомендуется выполнить эскиз блока с указанием расчетных параметров нагревательного элемента.

### Примеры решения задач

**Задача 5.1.** На свиноферме находится  $n = 50$  кабанов, свиной в три раза больше. Определить мощность системы отопления, если известно, что поток тепла, выделяемый одним животным,  $\Phi_1 = 10$  Вт; тепловой поток потерь через ограждения  $\Phi_{огр} = 800$  Вт; тепловой поток потерь с вентиляцией  $\Phi_в = 2000$  Вт; тепловой поток потерь на испарение влаги с различных поверхностей  $\Phi_и = 1250$  Вт. Коэффициент полезного действия, учитывающий потери теплоты в системе отопления  $\eta_m = 0,95$ .

#### Решение

Общее поголовье кабанов и свиной на ферме:

$$N = n + 3 \cdot n = 50 + 3 \cdot 50 = 200.$$

Тепловой поток, выделяемый животными:

$$\Phi_{жс} = N \cdot \Phi_1 = 200 \cdot 10 = 2000 \text{ Вт}.$$

Тепловой поток системы электроотопления:

$$\Phi_{от} = \Phi_{огр} + \Phi_в + \Phi_и - \Phi_{жс} = 800 + 2000 + 1250 - 2000 = 2050 \text{ Вт}.$$

Мощность системы электроотопления:

$$P_{от} = \frac{\Phi}{\eta_m} = \frac{2050}{0,95} = 2158 \text{ Вт}.$$

**Задача 5.2.** Чему равен общий поток тепловых потерь через строительные ограждения, если известно следующее: удельный тепловой поток потерь  $\Delta\Phi_{огр} = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С); строительный объем здания  $V = 300$  м<sup>3</sup>;  $t_{вн}$  и  $t_{н}$  – расчетные температуры внутри помещения и наружного воздуха равны соответственно 25°С и минус 15°С.

#### Решение

Общий поток тепловых потерь через строительные ограждения:

$$\Phi_{огр} = \Delta\Phi_{огр} \cdot V \cdot (t_{вн} - t_{н}) = 5 \cdot 300 \cdot (21 - (-15)) = 54000 \text{ Вт} = 54 \text{ кВт}.$$

**Задача 5.3.** В птичнике на 20000 бройлеров (средняя масса бройлеров  $m = 1,4$  кг/гол) смонтирована система утилизации теплоты из удаляемого воздуха. Используя уравнение теплового баланса, необходимо определить эффективность (процент снижения затрат на отопление) системы утилизации тепла, если КПД утилизатора  $\eta_{ym} = 0,50$ . Температура в птичнике  $t_{вн} = 18^\circ\text{C}$ , расчетная температура наружного воздуха  $t_n = -29^\circ\text{C}$ . Размеры птичника: длина×ширина×высота=80×20×3 м. Требуемая кратность воздухообмена  $k_g = 5\text{ч}^{-1}$ .

Площадь ограждений и коэффициент теплопередачи:

– потолочные перекрытия  $F_{пер} = 1600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мпер} = 1,17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

– стены  $F_{ст} = 600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мст} = 1,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

– ворота  $F_{в} = 30 \text{ м}^2$ ,  $k_{мв} = 2,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

– окна  $F_{ок} = 600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мок} = 2,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Теплота, выделяемая птицей,  $q_m = 11 \text{ Вт}/\text{кг}$ . Плотность и теплоемкость воздуха:  $\delta = 1,342 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $c = 0,278 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ . Теплотерями через пол пренебречь.

### Решение

Уравнение теплового баланса птичника можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{от} + \Phi_{нт} = \Phi_{огр} + \Phi_{вен},$$

из которого можно определить расчетную мощность отопительной системы:

$$\Phi_{от} = \Phi_{огр} + \Phi_{вен} - \Phi_{нт}.$$

Определяем потери теплоты через ограждающие конструкции птичника:

$$\begin{aligned} \Phi_{огр} &= k_{мпер} \cdot F_{пер} \cdot (t_{вн} - t_n) + k_{мст} \cdot F_{ст} \cdot (t_{вн} - t_n) + k_{мв} \cdot F_{в} \cdot (t_{вн} - t_n) + \\ &+ k_{мок} \cdot F_{ок} \cdot (t_{вн} - t_n) = [k_{мпер} \cdot F_{пер} + k_{мст} \cdot F_{ст} + k_{мв} \cdot F_{в} + k_{мок} \cdot F_{ок}] \times \\ &\times (t_{вн} - t_n) = \sum_{i=1}^n k_{mi} \cdot F_i \cdot (t_{вн} - t_n) = [1,17 \cdot 1600 + 1,54 \cdot 600 + 2,33 \cdot 30 + 2,68 \cdot 600] \times \\ &\times (18 - (-29)) = 138476,1 \text{ Вт} = 138,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Определяем теплоту, уносимую из помещения с вентилируемым воздухом:

$$\begin{aligned} \Phi_{вен} &= c \cdot \delta \cdot V \cdot k_g \cdot (t_{вн} - t_n) = 0,278 \cdot 1,342 \cdot 4800 \cdot 5 \cdot (18 - (-29)) = \\ &= 0,278 \cdot 1,342 \cdot 4800 \cdot 5 \cdot 47 = 420829,73 \text{ Вт} = 420,83 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Определяем теплоту, выделяемую птицей:

$$\Phi_{nm} = q_{nm} \cdot n \cdot m = 1,4 \cdot 11 \cdot 20000 = 308000 \text{ Вт} = 308 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность отопительной системы равна:

$$\Phi_{om} = \Phi_{огр} + \Phi_{вен} - \Phi_{nm} = 138,5 + 420,83 - 308 = 251,33 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность отопительной системы при наличии системы утилизации теплоты из удаляемого воздуха:

$$\Phi_{om}^{ym} = \Phi_{огр} + \Phi_{вен} \cdot (1 - \eta_{ym}) - \Phi_{жс} = 138,5 + 420,83 \cdot 0,5 - 308 = 40,915 \text{ кВт.}$$

Определяем эффективность применения утилизатора:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{om} - \Phi_{om}^{ym}}{\Phi_{om}} \cdot 100\% = \frac{251,33 - 40,915}{251,33} \cdot 100\% = 83,72\%,$$

т.е. использование системы утилизации тепла позволяет снизить мощность отопительной системы на 83,72%.

**Задача 5.4.** Рассчитать систему вентиляции и отопления коровника на 400 голов. Габариты коровника 111,6×22,2×7 м, объем стойлового помещения 100,6×21,4×2,2 м. Расчетная температура наружного воздуха  $-20^\circ\text{C}$ . Стены выполнены из красного кирпича, толщина стен 0,38 м, стены изнутри оштукатурены песчано-цементным раствором толщиной 0,02 м.

Перекрытие выполнено из сборных железобетонных плит толщиной 0,035 м, пароизоляции из одного слоя рубероида, настила из досок толщиной 0,03 м и утеплителя из минеральной ваты толщиной 0,16 м.

Полы в стойловом помещении из керамзитобетона, толщина которого 0,15 м, в помещении 66 окон размером 1,92×0,92 м с двойным остеклением и 4 двери с общей площадью 36 м<sup>2</sup>, выполненные из 2-х слоев досок, толщиной 0,03 м.

### Решение

1) *Расчет системы воздухообмена.* Определяем необходимый воздухообмен из условия удаления избыточной углекислоты. Выделение CO<sub>2</sub> одним животным составляет 142 л/ч, допустимая концентрация CO<sub>2</sub> составляет 2,5 л/м<sup>3</sup>, концентрация CO<sub>2</sub> в наружном воздухе составляет 0,3...0,4 л/м<sup>3</sup>.

$$L_{co_2} = \frac{\sum_{i=1}^k c_i \cdot n_i}{c_1 - c_2} = \frac{143 \cdot 400}{2,5 - 0,4} = 27238 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Для определения требуемого воздухообмена из условия удаления избыточной влаги необходимо определить общее влаговыделение всеми животными:

$$W = \xi \sum_{i=1}^k w_i \cdot n_i = 1,1 \cdot 455 \cdot 400 = 201520 \text{ г/ч.}$$

Отсюда

$$L_W = \frac{W}{d_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} \varphi_{\text{вн}} - d_{\text{н}} \delta_{\text{н}} \varphi_{\text{н}}} = \frac{201520}{7,6 \cdot 1,248 \cdot 0,7 - 0,8 \cdot 1,396 \cdot 0,8} = 35072 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Параметры внутреннего и наружного воздуха определяются по таблице П. 16.

Необходимый для расчетов воздухообмен  $L_{\text{расч}}$  принимается по наибольшей из двух величин  $L_{\text{CO}_2}$  или  $L_W$ . Так как  $L_W > L_{\text{CO}_2}$  то  $L_{\text{расч}} = 35072 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Осуществляем проверку на кратность воздухообмена:

$$k_e = \frac{L_{\text{расч}}}{V_{\text{ст.п}}} = \frac{35072}{100,6 \cdot 214 \cdot 2,2} = 7,$$

полученное значение практически удовлетворяет требованиям, так как для животноводческих ферм кратность воздухообмена равна  $k_e = 3 \dots 6$ .

Скорость воздуха в вытяжной шахте будет равна:

$$v = 2,2 \sqrt{\frac{h \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})}{273}} = 2,2 \sqrt{\frac{7 \cdot (10 - (-20))}{273}} = 1,97 \text{ м/с.}$$

Площадь сечения вытяжных шахт при естественной тяге составит:

$$F = \frac{L_{\text{расч}}}{3600 \cdot v} = \frac{35072}{3600 \cdot 1,97} = 5,05 \text{ м}^2.$$

Число вытяжных шахт:

$$n_{\text{в.ш}} = \frac{F}{f} = \frac{5,05}{0,6 \cdot 0,6} = 14 \text{ шахт.}$$

Принимается 2 ряда по 7 шахт в ряду.

Суммарная подача вентиляторов для удаления избыточной влаги с учетом поправочного коэффициента на подсосы в воздуховодах, который при стальных, пластмассовых и асбоцементных

воздуховодах длиной до 50 м равен 1,1, составит  $L_{г} = 1,1 \cdot 35072 = 38579 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Число вентиляторов определяется из условия, что подача одного вентилятора не должна превышать  $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$  с учетом предпочтительной схемы отопления и вентиляции.

2) *Расчет системы отопления.* Для расчета теплового режима необходимо определить площадь всех ограждений, которые могут быть определены по паспорту помещения или по его плану.

Площадь окон  $F_{ок} = 1,92 \cdot 0,9 \cdot 66 = 114 \text{ м}^2$ .

Площадь стен, выходящих в неотапливаемые помещения,  $F_{ст.вн} = 60 \text{ м}^2$ .

Площадь стен, выходящих наружу,  $F_{ст.нар} = 330 \text{ м}^2$ .

Площадь перекрытия  $F_{пер} = 2280 \text{ м}^2$ .

Сопротивление теплопередаче наружных стен:

$$R_{тст.н} = R_{твн} + \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_i}{\lambda_i} + R_{тми} = 0,116 + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,38}{0,81} + 0,043 = 0,649 (\text{м} \cdot \text{°C})/\text{Вт}.$$

Термическое сопротивление перекрытия:

$$R_{тпер} = R_{твн} + \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_i}{\lambda_i} + R_{тми} = 0,155 + \frac{0,035}{1,63} + \frac{0,03}{0,17} + \frac{0,0015}{0,17} + \frac{0,16}{0,07} + 0,123 = 2,894 (\text{м} \cdot \text{°C})/\text{Вт}.$$

Определяются тепловые потери через наружные стены:

$$\Phi_{ст.нар} = \frac{1}{0,649} \cdot 330 \cdot (10 - (-20)) \cdot 1 = 15254 \text{ Вт}.$$

Определяются тепловые потери через внутренние стены:

$$\Phi_{ст.вн} = \frac{1}{0,649} \cdot 60 \cdot (10 - (-20)) \cdot 0,5 = 1387 \text{ Вт}.$$

Определяются тепловые потери через перекрытие:

$$\Phi_{пер} = \frac{1}{2,894} \cdot 2280 \cdot (10 - (-20)) \cdot 0,9 = 21272 \text{ Вт}.$$

Термическое сопротивление для двойных окон равно  $0,345 (\text{м} \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , для одинарных окон –  $0,170 (\text{м} \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , для двойных отдельных окон –  $0,345 (\text{м} \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ .

Тепловые потери через окна равны:

$$\Phi_{ок} = \frac{1}{0,375} \cdot 114 \cdot (10 - (-20)) = 9913 \text{ Вт}.$$

Тепловые потери через двери составят:

$$\Phi_{дв} = \frac{1}{0,378} 36 \cdot (10 - (-20)) 0,5 = 1429 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери через полы определяются по участкам вдоль осевой линии. Ширина пола 21,4 м, соответственно расстояние от осевой линии до наружной стены будет  $21,4/2=10,7$  м. Так как площадь пола необходимо разделить на 2-метровые зоны, начиная от наружных стен, то получится 3 зоны по 2 м и одна зона шириной 4,7 м по обе стороны от осевой линии. Площадь зон  $F_1=F_2=F_3=100,6 \cdot 2 \cdot 2=402,4 \text{ м}^2$ ,  $F_4=4,7 \cdot 100,6 \cdot 2=945,6 \text{ м}^2$ .

Сопротивление теплопередаче для каждой зоны определяется по формулам

$$R_{m1y.n} = 2,15 + \frac{0,15}{0,35} = 2,58 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$$

$$R_{m2y.n} = 4,3 + \frac{0,15}{0,35} = 4,7 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$$

$$R_{m3y.n} = 8,6 + \frac{0,15}{0,35} = 9,03 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт,}$$

$$R_{m4y.n} = 14,2 + \frac{0,15}{0,35} = 14,628 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт.}$$

Отсюда

$$\Phi_{1n} = \frac{1}{1,58} 402,4 \cdot (10 - (-20)) = 4679 \text{ Вт,}$$

$$\Phi_{2n} = \frac{1}{4,7} 402,4 \cdot (10 - (-20)) = 2562 \text{ Вт,}$$

$$\Phi_{3n} = \frac{1}{9,03} 402,4 \cdot (10 - (-20)) = 1336 \text{ Вт,}$$

$$\Phi_{4n} = \frac{1}{14,62} 945,6 \cdot (10 - (-20)) = 3878 \text{ Вт.}$$

Таким образом, тепловые потери через все ограждения будут равны:

$$\begin{aligned} \Phi_{огр} &= \Phi_{ст.нар} + \Phi_{ст.вн} + \Phi_{нер} + \Phi_{ок} + \Phi_{дв} + \Phi_{1n} + \Phi_{2n} + \Phi_{3n} + \Phi_{4n} = \\ &= 61711 \text{ Вт.} \end{aligned}$$



Потери на вентиляцию будут равны:

$$\Phi_v = \frac{L \cdot \delta \cdot c \cdot (t_{вн} - t_n)}{3600} = \frac{35072}{3600} \cdot 1,396 \cdot 1000 \cdot (10 - (-20)) = 408004 \text{ Вт.}$$

Случайные и дополнительные потери будут равны:

$$\Phi_{cn} = 0,1 \cdot (\Phi_{огр} + \Phi_v) = 41418 \text{ Вт; } \Phi_{дон} = 0,1 \cdot \frac{\Phi_{огр}}{2} = 3086 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, выделяемый животными:

$$\Phi_{жс} = \sum_{i=1}^k q_i \cdot n_i = 722,2 \cdot 400 = 288880 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, необходимый для отопления животноводческого помещения составит,

$$\begin{aligned} \Phi_{от} &= \Phi_{огр} + \Phi_v + \Phi_{cn} + \Phi_{дон} - \Phi_{жс} = \\ &= 61711 + 408004 + 41418 + 3086 - 288880 = 8425 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

**Задача 5.5.** Провести тепловой и конструктивный расчет нагревательного блока электрокалорифера мощностью  $P_{эку} = 36$  кВт. Компоновка ТЭНов шахматная.

### Решение

1) *Тепловой расчет.* В калорифере установим 18 штук ТЭНов, количество рядов  $z=3$ , количество ТЭНов в ряду  $k=6$ . Мощность одного ТЭНа:

$$P_m = \frac{P_{эку}}{z} = \frac{36000}{18} = 2000 \text{ Вт.}$$

Выбираем ТЭН80В13/2,0К220 (табл. П. 8). Мощность ТЭНа  $P_m = 2000$  Вт, активная длина  $l_a = 0,8$  м, диаметр  $D = 0,013$  м.

Рассчитаем коэффициент теплоотдачи ТЭНа. Выбираем скорость воздуха в калорифере  $v = 14$  м/с.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{14 \cdot 0,013}{18,5 \cdot 10^{-6}} = 9837,83.$$

Критерий Нуссельта для шахматной компоновки, при  $Re > 1 \cdot 10^3$ :

$$Nu = 0,35 Re^{0,6} = 0,35 \cdot 9837,83^{0,6} = 87,05.$$

Коэффициент теплоотдачи ТЭНа:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{87,05 \cdot 0,027}{0,013} = 180,79 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Средний коэффициент теплоотдачи для шахматной компоновки:

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha \cdot (z - 0,7)}{z} = \frac{180,79(3 - 0,7)}{3} = 138,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Суммарная мощность первого ряда ТЭНов:

$$P_m^1 = k P_m = 6 \cdot 2000 = 12000 \text{ Вт}.$$

Площадь поверхности одного ТЭНа с учетом оребрения: шаг оребрения  $b=0,005$  м, высота ребра  $h_p=0,012$  м:

$$F_m = \pi \cdot l_a \left( D + \frac{h_p \cdot (D + h_p)}{b} \right) = 3,14 \cdot 0,8 \left( 0,013 + \frac{0,012(0,013 + 0,012)}{0,005} \right) = 0,183 \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь первого ряда ТЭНов:

$$F_m^1 = k \cdot F_m = 6 \cdot 0,183 = 1,098 \text{ м}^2.$$

Температура воздушного потока после калорифера:

$$t_6 = \frac{P_\kappa}{\delta \cdot c \cdot L_6} = \frac{18 \cdot 2000}{1,1 \cdot 1000 \cdot 1,45} = 22,57 \text{ °C}.$$

Температура ТЭНов первого ряда:

$$t_m^1 = \frac{P_m^1}{0,6 \cdot \alpha_{cp} \cdot F_m^1} + t_6 = \frac{12000}{0,6 \cdot 138,6 \cdot 1,098} + 22,57 = 153,99 \text{ °C},$$

что соответствует норме.

2) *Конструктивный расчет.* «Живое» сечение блока нагревателей

$$F_\kappa = \frac{L_6}{v} = \frac{1,45}{14} = 0,103 \text{ м}^2.$$

Расстояние между нагревателями в ряду:

$$x_1 = \frac{F_\kappa}{(k+1) \cdot l_a} + D = \frac{0,103}{(6+1) \cdot 0,8} + 0,037 = 0,0553 \text{ м}.$$

Расстояние между рядами нагревателей:

$$\frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 0,037 = 0,0555,$$

так как  $0,0555 > 0,0553$  следовательно

$$x_2 = 1,2 \cdot x_1 = 1,2 \cdot 0,0553 = 0,0663 \text{ м.}$$

Высота блока нагревателей:

$$H = (k + 1) \cdot x_1 = (6 + 1) \cdot 0,0553 = 0,387 \text{ м.}$$

Ширина блока нагревателей:

$$B_n = l + 0,1 = 0,8 + 0,1 = 0,9 \text{ м.}$$

Глубина блока нагревателей:

$$C_n = (z + 1) \cdot x_2 = (3 + 1) \cdot 0,0663 = 0,265 \text{ м.}$$

### Контрольные задания

1. В коровнике находится 45 коров, каждая из которых выделяет 7 Вт тепла. Тепловой КПД –  $\eta_m = 0,92$ . Мощность системы электроотопления  $P_o = 1900$  Вт. Определить суммарный тепловой поток потерь.

2. Длина одного из помещений птицефабрики 50 м, ширина 25 м, высота 15 м. Температура воздуха внутри помещения 293 К, наружного воздуха – 274 К. Определить поток тепловых потерь через стены помещения (ограждения)  $\Phi_{огр}$ , если известно, что удельный тепловой поток потерь  $\Delta\Phi_{огр} = 3$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

3. Определить полезную мощность электрокалорифера для подогрева поступающего снаружи воздуха с температурой  $t_n = -40^\circ\text{C}$  внутрь животноводческого помещения с тем, чтобы воздух подогревался в нем до температуры  $t_{вн} = 10^\circ\text{C}$ , если подача вентилятора равна  $L = 500$  м<sup>3</sup>/ч; удельная массовая теплоемкость воздуха  $c = 1$  кДж/(кг·°С).

4. Рассчитать систему вентиляции и отопления коровника на 200 голов. Габариты коровника 105×20×7 м, объем стойлового помещения 95×20×2 м. Расчетная температура наружного воздуха минус 25°С. Стены выполнены из красного кирпича, толщина стен 0,40 м, стены изнутри оштукатурены песчано-цементным раствором толщиной 0,02 м.

Перекрытие выполнено из сборных железобетонных плит, толщиной 0,035 м, пароизоляции из одного слоя рубероида, настила из досок толщиной 0,03 м и утеплителя из минеральной ваты толщиной 0,16 м.

Полы в стойловом помещении из керамзитобетона, толщина которого 0,15 м, в помещении 60 окон размером 1,92×0,92 м с двойным остеклением и 4 двери с общей площадью 36 м<sup>2</sup>, выполненные из 2-х слоев досок толщиной 0,03 м.

5. В птичнике на 10000 кур яичных пород клеточного содержания смонтирована система утилизации теплоты из удаляемого воздуха. Необходимо определить эффективность (процент снижения затрат на отопление) системы утилизации тепла, если КПД утилизатора  $\eta_{ум} = 0,60$ . Температура в птичнике  $t_{вн} = 20^\circ\text{C}$ , расчетная температура наружного воздуха

$t_n = -25^\circ\text{C}$ . Размеры птичника: длина×ширина×высота=80×20×3 м. Требуемая кратность воздухообмена  $k_g = 5 \text{ ч}^{-1}$ .

Площадь ограждений и коэффициент теплопередачи:

- потолочные перекрытия  $F_{пер} = 1600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мпер} = 1,17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- стены  $F_{ст} = 600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мст} = 1,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- ворота  $F_{в} = 30 \text{ м}^2$ ,  $k_{мв} = 2,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- окна  $F_{ок} = 600 \text{ м}^2$ ,  $k_{мок} = 2,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Теплопотерями через пол пренебречь.

### Контрольные вопросы

1. Что такое микроклимат помещения, его основные параметры?
2. Уравнение теплового баланса животноводческих помещений.
3. Как определяются теплопотери через ограждения?
4. Как определяются теплопотери на вентиляцию?
5. Как определяются тепловыделения животными?
6. Как определяется мощность электроотопительной установки?
7. Устройство электрокалориферной установки (ЭКУ) типа СФОЦ.
8. Как осуществляется выбор ЭКУ? Задачи проверочного расчета.
9. Как регулируется мощности в ЭКУ?
10. Как регулируется температура воздуха на выходе из ЭКУ типа СФОЦ?

## **6. Расчет мощности электрокалориферной установки для сушки сена активным вентилярованием**

### **6.1. Общие сведения о методике расчета установок для активного вентилирования**

*Сушка сена.* Применение метода активного вентилирования для досушки сена позволяет значительно сократить потери питательных веществ, так как при этой технологии скошенную траву и сено убирают с поля при влажности 35...40% и досушивают в местах постоянного хранения на специально изготовленных воздухо-распределителях.

Преимущество заготовки сена методом активного вентилирования по сравнению с полевой сушкой заключается в сокращении времени пребывания скошенных трав в поле, зависимости процесса сушки от неблагоприятных погодных условий, увеличении валового сбора сена с единицы площади, а также в более полном сохранении протеина и каротина. При сушке сена активным вентилярованием содержание каротина составляет 100...120 мг на 1 кг, а при полевой сушке 35...40 мг. Применение этой технологии сокращает потери листьев, повышает питательность корма на 20...30%. Затраты труда на производство одной кормовой единицы снижаются на 10...15%.

Досушку активным вентилярованием можно применять как при заготовке рассыпного, так и прессованного сена. Но приготовление рассыпного измельченного сена наиболее перспективно, так как уменьшаются механические потери за счет сокращения полевых операций, повышается качество сена, полностью устраняется ручной труд на заготовке и раздаче корма животным, повышается производительность труда.

Технологический процесс активного вентилирования можно кратко описать следующим образом. Предварительно скошенную траву провяливают на солнце до влажности 35...40%. После этого сено укладывают слоями толщиной 1...1,5 м на подстожном канале, выполненном в виде несущей фермы, и продувают воздухом в

течение 2...3 дней до влажности 26...30%, затем укладывают следующий слой, при этом общая толщина слоев 4...6 м, а влажность готового сена должна быть в пределах 14...17%. Длительность сушки сена в скирде составляет 45...80 ч, удельный расход электрической энергии – 30...45 кВт·ч/т. После окончания сушки установку вытягивают из-под скирды трактором при помощи троса.

#### **Порядок расчета установок для активного вентилирования.**

1) Определяется количество влаги в траве, кг:

$$M_1 = \frac{W_1 \cdot m_1}{100\%}, \quad (6.1)$$

где  $m_1$  – масса травы, кг;  $W_1$  – относительная влажность травы, %.

2) Количество влаги в сене, кг:

$$M_2 = \frac{W_2 \cdot m_2}{100\%}, \quad (6.2)$$

где  $m_2$  – масса сена, кг;  $W_2$  – относительная влажность сена, %.

3) Количество влаги, испаряемой в процессе сушки, кг:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{W_1 \cdot m_1 - W_2 \cdot m_2}{100\%}. \quad (6.3)$$

Подогрев воздуха на 1°С снижает влажность на 5-6 %.

4) Определяется масса абсолютно сухого сена, кг:

$$\left. \begin{aligned} m &= m_1 - M_1 = m_1 \cdot \left( \frac{100\% - W_1}{100\%} \right) \\ m &= m_2 - M_2 = m_2 \cdot \left( \frac{100\% - W_2}{100\%} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

отсюда соотношение между  $m_2$  и  $m_1$  определяется через относительную влажность исходной травы и сена, кг:

$$m_2 = m_1 \cdot \frac{100\% - W_1}{100\% - W_2}. \quad (6.5)$$

5) Определяется количество влаги, подлежащее удалению, кг:

$$M = m_1 \frac{W_1 - W_2}{100\% - W_2} \quad (6.6)$$

или

$$M = m_2 \frac{W_1 - W_2}{100\% - W_1}. \quad (6.7)$$

б) Необходимая производительность вентилятора  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, для удаления избыточной влаги определяется из формулы

$$L = \frac{M}{(d_2 - d_1) \cdot \tau \cdot \delta}, \quad (6.8)$$

где  $d_1$  – влагосодержание воздуха до поступления в стог, г/кг;  $d_2$  – влагосодержание воздуха после обработки, г/кг;  $\tau$  – время сушки, ч;  $\delta$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Влагосодержание воздуха на входе и после обработки можно определить по формулам, г/кг:

$$d_1 = d_1' \cdot \varphi_{нач} \quad (6.9)$$

и

$$d_2 = d_2' \cdot \varphi_{кон}, \quad (6.10)$$

где  $\varphi_{нач}$  – относительная влажность воздуха на входе в стог сена;  $\varphi_{кон}$  – относительная влажность воздуха на выходе из стога сена;  $d_1'$  – количество насыщающих водяных паров в 1 кг сухого воздуха на входе в стог сена, при соответствующей температуре, г/кг;  $d_2'$  – количество насыщающих водяных паров в 1 кг сухого воздуха на выходе из стога сена при соответствующей температуре, г/кг.

7) Мощность электродвигателя для привода вентилятора, Вт:

$$P_э = \frac{L \cdot H}{\eta_э \cdot \eta_{пер}}, \quad (6.11)$$

где  $H$  – полный напор вентилятора, Па;  $\eta_э$  – КПД вентилятора,  $\eta_э=0,5 \dots 0,6$ ;  $\eta_{пер}$  – КПД передачи.

8) Полный напор вентилятора определяется по формуле

$$H = h_{мп} + h_{мест} + h_{стога}, \quad (6.12)$$

где  $h_{дин}$  – динамический напор, Па;  $h_{трел}$  – напор, необходимый на преодоление трения воздуха о стенки воздуховода, Па;  $h_{мест}$  – потери напора от местных сопротивлений, Па;  $h_{стога}$  – потери напора в стоге сена, принимается в зависимости от высоты стога, Па, 500...700 Па.

Потери напора в воздуховоде будут равны, Па:

$$h_{мп} = \alpha \cdot \frac{l}{d} \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (6.13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент трения воздуха в трубопроводе,  $\alpha = 0,02$ ;  $l$  и  $d$  – длина и диаметр воздуховода, м;  $\delta$  – плотность воздуха при соответствующей температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость воздушного потока в воздуховоде, м/с.

Потери напора от местных сопротивлений будут равны, Па:

$$h_{мест} = \sum \xi \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (6.14)$$

где  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Потери напора в стоге сена  $h_{стога}$  принимаются в зависимости от высоты стога – 400...700 Н/м<sup>2</sup> (Па).

Коэффициенты местных сопротивлений  $\xi$  для отдельных участков вентиляционной системы: а) жалюзийная решетка на входе  $\xi = 0,5$ ; б) колено воздуховода под углом 90° при радиусе скругления в два диаметра воздуховода  $\xi = 0,15$ .

9) Мощность электрокалорифера, кВт:

$$P_k = \frac{L \cdot c \cdot \Delta t \cdot \delta}{\eta_{эку} \cdot 3600}, \quad (6.15)$$

где  $c$  – теплоемкость воздуха, 1,282 кДж/(кг·°C);  $\Delta t$  – повышение температуры воздуха при нагреве в электрокалорифере, не более 6°C;  $\delta$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_{эку}$  – КПД электрокалорифера,  $\eta_{эку} = 0,9 \dots 0,95$ .

При большем повышении температуры испаренная влага из травы не успевает из неё уходить, в результате внутри тканей травы создается повышенное давление и трава разрывается на множество мелких частиц, что существенно снижает качество сена.

10) Расчет электрокалорифера выполняется по обычной методике.

В качестве примера можно привести параметры электрокалориферов НВЭ к установкам вентилирования сена УВС-10 и ОВС-16 с длиной подстожных каналов соответственно 10 и 16 м. Электрокалориферы типа НВЭ-63 и НВЭ-100 (нагреватель воздуха электрической мощностью 63 и 100 кВт) устанавливаются между вентиляторами и подстожными каналами.

Электрокалориферы этого типа имеют специально разработанные ТЭНы с латунными трубками и такими же пластинами оребрения. Длина ТЭНов равна 1 м, глубина электрокалориферов составляет соответственно 0,85 и 1,1 м. Основные технические параметры электрокалориферов типа НВЭ-63 и НВЭ-100 приведены в таблице 6.1.



Таблица 6.1

**Технические параметры электрокалориферов типа НВЭ**

Показатель	НВЭ-63	НВЭ-100
Тип используемой установки для сушки сена	УВС-10	ОВС-16
Мощность электрокалорифера, кВт	63	100
Мощность одного ТЭНа, кВт	1,5	2,1
Число нагревателей	42	48
Число секций	2	2
Разница температур на выходе и входе, °С	6,5	7
Продолжительность разогрева, мин	7	8
Тип вентилятора	Ц4-70 №10	ВО-6-290-11
Объемная подача воздуха, м <sup>3</sup> /ч	30	50-55
Мощность электродвигателя вентилятора, кВт	17	10

*Активное вентилирование зерна.* Под активным вентилированием понимают принудительное продувание зерновой массы воздухом без ее перемещения, что возможно благодаря скважистости зерновой массы. В зависимости от назначения различают несколько видов вентилирования:

1) Профилактическое вентилирование предназначено для предотвращения самосогревания зерна – его проводят периодически, используя преимущественно ночное время суток и временное похолодание.

2) Вентилирование для охлаждения зерна проводят для снижения температуры до 0...10°С, при которой физиологические и микробиологические процессы в зерновой массе затормаживаются, а вредители впадают в анабиоз.

3) Вентилирование для промораживания зерна проводят для понижения его температуры ниже 0°С, так как в замороженном зерне активность физиологических и биохимических процессов снижается до минимума, а жизнедеятельность микроорганизмов и вредителей хлебных запасов приостанавливается. При температуре –4...–5°С вредители впадают в состояние глубокого окоченения, а при длительном воздействии отрицательных температур – погибают. При охлаждении зерна до минус 15°С большинство клещей и других насекомых погибает в течение суток. Таким образом, вентилирование для промораживания может быть использовано для обработки зараженного зерна.

4) Вентилирование для ликвидации самосогревания зерна. Для прогрева семян их вентилируют теплым или слегка подогретым воздухом.

5) Вентилирование для аэрации межзерновых пространств. В процессе хранения в результате дыхания семян кроме теплоты и влаги выделяется углекислый газ, а так как семена живые организмы, то они могут погибнуть в бескислородной среде. Активное вентилярование освежает межзерновое пространство, обогащает его кислородом и тем самым позволяет сохранить жизнеспособность семян.

б) Активное вентилярование, которое можно применять также и для сушки зерна. При сушке зерна атмосферным воздухом продолжительность вентилярования не должна превышать периода безопасного хранения зерна. Для этого пользуются специальной таблицей, в которой приводятся данные по безопасному хранению зерна в зависимости от культуры, температуры зерна и его влажности. Недостатки сушки зерна активным вентилярованием атмосферным воздухом – это длительность процесса, зависимость от погодных условий и неравномерность сушки по высоте слоя.

Более эффективна сушка зерна подогретым воздухом. В этом случае сушку можно проводить независимо от погодных условий и значительно сократить время. Воздух обычно подогревают на 10...15°C, но его температура не должна превышать 30...35°C, так как более высокие температуры приводят к пересушиванию зерна в нижних слоях насыпи. Указанная степень подогрева вполне достаточна для того, чтобы проводить сушку зерна в сырую погоду при относительной влажности воздуха 100 %.

Сушку активным вентилярованием наиболее целесообразно применять для зерна, которое подвержено растрескиванию в зерносушилках, а именно семян кормовых бобов, сои, гороха, люпина, кукурузы. С учетом того, что мягкие режимы сушки благоприятно влияют на послеуборочное дозревание семян и способствуют улучшению их посевных качеств, следует использовать метод активного вентилярования для сушки семенного зерна.

Процесс активного вентилярования зерна осуществляют в закромах и специальных бункерах.

В закромах зерно насыпают слоем 1...1,5 м над воздухораспределительными каналами и продувают холодным или подогретым воздухом с помощью вентиляторов, расположенных снаружи сооружения.

Для подогрева воздуха используют воздухоподогреватель ВПЭ-6А установленной мощностью 26 кВт, в том числе мощность

электрокалорифера составляет 16 кВт. Подача воздуха равна 6000 м<sup>3</sup>/ч. Агрегат располагается снаружи зданий или сооружений и соединяется воздуховодами с воздухораспределительной системой закромов. Одновременно можно вентилировать зерно, насыпанное слоем до 1,5 м на площади до 18 м<sup>2</sup>. Электрокалорифер имеет 32 ТЭНа, включенных в три секции, что позволяет изменять мощность, а следовательно, и температуру выходящего воздуха

Бункера активного вентилирования БВ-25 и БВ-40 имеют два коаксиальных перфорированных цилиндра, в кольцевой зазор между которыми засыпается зерно. Во внутренний цилиндр с помощью центробежного вентилятора подается холодный или подогретый воздух, который пронизывает слой зерна в радиальном направлении и уносит лишнюю влагу. При влажности более 65% воздух может подогреться на 5...6°С двухсекционным электрокалорифером.

Бункера БВ-25 и БВ-40 имеют вместимость соответственно 25 и 40 т. Установленная мощность 29,5 и 47,5 кВт, в том числе мощность электрокалориферов 24 и 40 кВт. Бункера размещают в зданиях закрытого типа с легкими ограждающими конструкциями.

#### **Последовательность расчета мощности электроподогревателей воздуха, используемых для сушки зерна активным вентилированием.**

Исходными данными для расчета являются: производительность установки по сырому зерну  $G_1$ , кг/ч, и по высушенному –  $G_2$ , кг/ч; параметры влажного зерна: температура  $t_1$ , °С, относительная влажность  $\varphi_1$ , %; параметры высушенного зерна: температура  $t_2$ , °С, относительная влажность  $\varphi_2$ , %; параметры наружного воздуха: температура  $t_o$ , °С, относительная влажность  $\varphi_o$ , %. Конечной температурой  $t_2$  и относительной влажностью воздуха  $\varphi_2$  на выходе из сушильной установки задаются или принимают их по опыту эксплуатации подобных установок. Значение  $\varphi_2$  чаще всего принимают равным 80%.

По исходным данным из  $I-d$  диаграммы влажного воздуха находят значения:  $I_o, I_1, d_1, d_2$ .

Из материального баланса сушки определяют количество испаряемой влаги, кг/ч:

$$M = \Pi_1 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100\% - W_2}. \quad (6.16)$$

Часовой расход воздуха, необходимый для удаления влаги, кг/ч:

$$L = \frac{M \cdot 1000}{d_2 - d_1}. \quad (6.17)$$

Разность  $\Delta t = d_2 - d_1$  представляет собой удельный влагосъём на 1 кг воздуха, прошедшего через зерно. Удельный влагосъём тем больше, чем выше скорость и температура теплоносителя, влажность материала и совершеннее конструкция сушилки.

Потребная мощность электроподогревателей воздуха, кВт:

$$P = \frac{L \cdot (I_1 - I_o)}{3600 \cdot \eta_s}, \quad (6.18)$$

где  $\eta_s$  – КПД электрокалорифера,  $\eta_s = 0,91 \dots 0,95$

### Примеры решения задач

**Задача 6.1.** Рассчитать и выбрать электрокалориферную установку для сушки сена активным вентилированием по следующим данным: масса сена  $m_2 = 50$  т; влажность сена  $W_2 = 17\%$ ; начальная влажность исходной травы  $W_1 = 40\%$ ; расчетная температура окружающего воздуха  $25^\circ\text{C}$ ; средняя относительная влажность отработанного воздуха  $\phi_{кон} = 90\%$ ; начальная относительная влажность окружающего воздуха  $\phi_{нач} = 40\%$ ; длительность сушки  $\tau = 100$  ч; длина воздуховода  $l = 2,5$  м; скорость воздушного потока в воздуховоде  $v = 5$  м/с.

#### Решение

Определяем количество влаги в исходной траве:

$$m_1 = m_2 \cdot \frac{100 - W_2}{100 - W_1} = \frac{50000 \cdot (100 - 17)}{100 - 40} = 69,166 \text{ т},$$

$$M_1 = \frac{W_1 \cdot m_1}{100} = \frac{40 \cdot 69,166}{100} = 27,67 \text{ т}.$$

Определяем массу абсолютно сухого сена из уравнений, для этого необходимо определить количество влаги в сене:

$$M_2 = \frac{m_2 \cdot W_2}{100} = \frac{50000 \cdot 17}{100} = 8500 \text{ кг}.$$

Масса абсолютно сухого сена:

$$m = m_1 - M_1 = 69,17 - 27,668 = 41,502 \text{ т}.$$

Количество влаги, испаряемой в процессе сушки:

$$M = M_1 - M_2 = 27,668 - 8,500 = 19,17 \text{ т.}$$

или

$$M = m_1 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100\% - W_2} = 69,166 \cdot \frac{40 - 17}{100 - 17} = 19,17 \text{ т.}$$

Требуемая производительность вентилятора для удаления избыточной влаги равна:

$$L = \frac{M \cdot 1000}{(d_2 - d_1) \cdot \tau \cdot \delta} = \frac{19170 \cdot 1000}{(23,5 - 12) \cdot 100 \cdot 1,185} = 14,067 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$d_1 = d_1' \cdot \varphi_{нач} = 20 \cdot 0,6 = 12 \text{ г/кг}, \quad d_2 = d_2' \cdot \varphi_{кон} = 26,2 \cdot 0,9 = 23,5 \text{ г/кг}.$$

Полный напор вентилятора определим как

$$H = h_{мп} + h_{мест} + h_{стоба} = 1,5 + 9,62 + 600 = 610,12 \text{ Па}.$$

Потери напора в воздуховоде и местные потери равны:

$$h_{мп} = \alpha \cdot \frac{l}{d} \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{2,5}{0,5} \cdot 1,185 \cdot \frac{5^2}{2} = 1,5 \text{ Н/м}^2,$$

$$h_{мест} = \sum \xi \cdot h_{дин} = \sum \xi \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2} = (0,5 + 0,15) \cdot 1,185 \cdot \frac{5^2}{2} = 9,62 \text{ Н/м}^2.$$

Потери напора в стоге сена принимаем равными 600 Па.

Мощность электродвигателя для привода вентилятора:

$$P_6 = \frac{L \cdot H}{\eta_6 \cdot \eta_{пер} \cdot 3600} = \frac{14067 \cdot 610,12}{0,6 \cdot 1 \cdot 3600} = 3973 \text{ Вт}.$$

Мощность электрокалорифера:

$$P_\kappa = \frac{L \cdot c \cdot \Delta t \cdot \delta}{\eta_{эку} \cdot 3600} = \frac{14,067 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 1,185}{0,95 \cdot 3600} = 24370 \text{ Вт}.$$

Таким образом, электрокалорифер должен быть мощностью не менее 25 кВт, а производительность вентилятора – не менее 14 000 м<sup>3</sup>/ч.

**Задача 6.2.** Определить мощность электроподогревателей воздуха для установки активного вентилирования вместимостью 50 т. Продолжительность сушки 100 ч. Начальная влажность зерна  $W_1 = 23\%$ ; конечная –  $W_2 = 14\%$ . Параметры наружного воздуха:  $t_o = 15^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_o = 60\%$ . Воздух подогревается на  $6^\circ\text{C}$ . Температура воздуха, покидающего ворох зерна,  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ ; влажность  $\varphi_2 = 80\%$ .

### Решение

По исходным данным из  $I-d$  диаграммы влажного воздуха находим:  $I_o = 31,4$  кДж/кг;  $d_o = d_1 = 6,5$  г/кг;  $I_1 = 37,7$  кДж/кг;  $d_2 = 9,2$  г/кг.

Определяем количество испаряемой влаги:

$$M = m_1 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100\% - W_2} = 50 \cdot 10^3 \cdot \frac{23 - 14}{100 - 14} = 5240 \text{ кг.}$$

Необходимый часовой расход воздуха для удаления влаги:

$$L = \frac{M \cdot 1000}{d_2 - d_1} = \frac{5240 \cdot 1000}{(9,2 - 6,5) \cdot 100} = 19400 \text{ кг/ч.}$$

Потребная мощность воздухоподогревателей при  $\eta_o = 0,92$ :

$$P = \frac{L \cdot (I_1 - I_o)}{\eta_o \cdot 3600} = \frac{19400 \cdot (37,7 - 31,4)}{0,92 \cdot 3600} = 37 \text{ кВт.}$$

### Контрольные задания

1. Рассчитать и выбрать электрокалориферную установку для сушки сена активным вентилированием по следующим данным: масса сена  $m_2 = 30$  т; влажность сена  $W_2 = 15\%$ ; начальная влажность исходной травы  $W_1 = 35\%$ ; расчетная температура окружающего воздуха  $22^\circ\text{C}$ ; средняя относительная влажность отработанного воздуха  $\varphi_{\text{кон}} = 90\%$ ; начальная относительная влажность окружающего воздуха  $\varphi_{\text{нач}} = 38\%$ ; длительность сушки  $\tau = 80$  ч; длина воздуховода  $l = 5,5$  м; скорость воздушного потока в воздуховоде  $v = 5$  м/с.

### Контрольные вопросы

1. Какова технология заготовки сена активным вентилированием?
2. Качество сена, заготовленного активным вентилированием.
3. Температурные режимы сушки сена активным вентилированием.
4. Перечислите факторы, влияющие на интенсивность сушки.
5. Как определить количество влаги, подлежащей удалению из исходной травы?
6. Как определить мощность электрокалорифера для сушки сена?
7. Как определить производительность вентилятора и мощность электродвигателя для его привода?

## 7. Расчет теплового режима парников

### 7.1. Общие сведения из теории расчета теплового режима парников

В культивационных сооружениях, особенно в парниках и теплицах сезонной эксплуатации: весна и осень, широко распространены системы подогрева внутренней воздушной среды. Мощность установок для электрообогрева теплиц и парников должна быть достаточна для компенсации потерь тепла в окружающую среду в ночном режиме, когда отсутствует естественная солнечная радиация, а наружная температура имеет минимальное значение.

Подробный тепловой расчет помещений защищенного грунта оказывается нередко затруднительным из-за неопределенности некоторых исходных данных: кратности воздухообмена, инфильтрации, потерь тепловой энергии в грунт и т.п. Поэтому для практических и оценочных расчетов мощность электронагревательных установок определяют по приближенной методике, в основе которой лежит необходимость компенсации потерь тепла через ограждающие конструкции.

Температура внутри парника  $t_{вн}$  будет устойчива в том случае, если количество теплоты, отдаваемое парником или теплицей в окружающую среду, будет равно количеству теплоты, выделяемой нагревательным устройством для обогрева внутреннего воздушного пространства культивационного сооружения. Расчетная мощность нагревательной установки, компенсирующей теплопотери в окружающую среду, определяется по формуле, Вт:

$$P_m = \alpha \cdot F \cdot (t_{вн} - t_n), \quad (7.1)$$

где  $\alpha = \alpha_c + C\alpha_o$  – коэффициент теплоотдачи парника в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к грунту,  $\alpha_c = 1..1,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $C$  – коэффициент, учитывающий потери на инфильтрацию;  $C = 1,2$  для рам с одинарным остеклением,  $C = 1,1$  для рам с двойным остеклением;  $\alpha_o$  – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к наружному, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F$  – площадь остекления, м<sup>2</sup>;  $t_n$  – температура наружного воздуха, °C.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_o$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), определяется в зависимости от вида ограждения парника:

$$\alpha_o = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{n_c \cdot \Delta_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta_m}{\lambda_m} + \frac{\Delta_в}{\lambda_в} \cdot (n_c - 1)}, \quad (7.2)$$

где  $\alpha_{вн}$  – коэффициент теплопередачи от внутреннего воздуха к стеклу,  $\alpha_{вн} = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи от стекла наружному воздуху,  $\alpha_{нар} = 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $n_c$  – число остеклений;  $\Delta_c$  – толщина стекла,  $\Delta_c = 0,002 \dots 0,004$  м;  $\Delta_m$  – толщина мата, м;  $\Delta_в$  – толщина воздушного промежутка между стеклами, м;  $\lambda_c$  – теплопроводность стекла,  $\lambda_c = 0,745$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\lambda_m$  – теплопроводность мата, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\lambda_в$  – теплопроводность воздушного промежутка,  $\lambda_в = 0,28$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Расчетная наружная температура самого холодного месяца в период эксплуатации определяется по формуле, °С:

$$t_{н.р} = t_{ср} + 0,6 \cdot (t_{мин} - t_{ср}), \quad (7.3)$$

где  $t_{ср}$  – средняя температура наиболее холодного месяца в период эксплуатации, °С;  $t_{мин}$  – минимальная температура наиболее холодного месяца данной климатической зоны, °С.

Следовательно, тепловой поток (мощность), теряемый в окружающую среду, можно определить по формуле, Вт:

$$P_m = \left( \alpha_2 + C \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_{нар}} + \frac{n_c \cdot \Delta_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta_m}{\lambda_m} + \frac{\Delta_в}{\lambda_в} \cdot (n_c - 1)} \right) \times F(t_{вн} - t_{н.р}). \quad (7.4)$$

### Примеры решения задач

**Задача 7.1.** Определить мощность для обогрева квартала парников. Число парников  $n = 12$ , число рам в парнике  $m = 20$ , размеры рам  $a \times b = 1,6 \times 1,06$  м. Температура внутри парника  $t_{вн} = 10^\circ\text{С}$ ; средняя температура самого холодного месяца в период эксплуатации  $t_{ср} = -10^\circ\text{С}$ ; минимальная температура наиболее холодного месяца данной климатической зоны  $t_{мин} = -15^\circ\text{С}$ . Рамы имеют двойное остекление. Исходные параметры ограждений и характеристики материалов:  $n_c = 2$ ;  $\alpha_2 = 1$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);



$C = 1,1$ ;  $\alpha_{\text{вн}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $\alpha_{\text{н}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $\Delta_c = 0,002 \text{ м}$ ;  
 $\lambda_c = 0,745 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $\Delta_{\text{с}} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda_{\text{с}} = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

### Решение

Определяем площадь парника:

$$F = n \cdot m \cdot a \cdot b = 12 \cdot 20 \cdot 1,6 \cdot 1,06 = 407 \text{ м}^2.$$

Средняя расчетная наружная температура воздуха самого холодного месяца за период эксплуатации будет равна:

$$t_{\text{н.р}} = t_{\text{ср}} + 0,6 \cdot (t_{\text{мин}} - t_{\text{ср}}) = -10 + 0,6 \cdot (-15 - (-10)) = -13^\circ\text{С}.$$

Тепловой поток потерь, определяющий мощность для обогрева парников составит:

$$P_m = \left( \alpha_{\text{с}} + C \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{n_{\text{с}} \cdot \Delta_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} \cdot (n_{\text{с}} - 1)} \right) \cdot F \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н.р}}) =$$

$$= \left( 1 + 1,1 \cdot \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{25} + \frac{0,002}{0,745} + \frac{0,1}{0,26} \cdot (2 - 1)} \right) \cdot 407 \cdot (10 - (-13)) = 27400 \text{ Вт}.$$

**Задача 7.2.** При сильных морозах, для того чтобы не увеличивать установленную мощность нагревателей парников, рамы закрывают теплоизоляционными матами. Определить, какой толщины необходим мат из минеральной ваты ( $\lambda_{\text{с}} = 0,017 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  – теплопроводность минеральной ваты) исходя из условий задачи 7.1, чтобы сохранить прежние потери в окружающую среду при снижении температуры до  $t_{\text{н}} = -25^\circ\text{С}$ .

### Решение

Уравнение теплового баланса парника в общем виде может быть представлено следующим образом:

$$P_m = \left( \alpha_{\text{с}} + C \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{n_{\text{с}} \cdot \delta_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} \cdot (n_{\text{с}} - 1)} \right) \cdot F \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}).$$

Подставив расчетные значения известных составляющих уравнения теплового баланса, получим уравнение следующего вида:

$$P_m = \left( 1 + \frac{1,1}{0,523 + \frac{\delta_{\text{мб}}}{\lambda_{\text{мб}}}} \right) \cdot 407 \cdot (10 - (-25)) = 27400 \text{ Вт.}$$

После подстановки  $\lambda_{\text{б}} = 0,017 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  определим требуемую толщину мата из минеральной ваты  $\delta_{\text{мб}} = 0,0115 \text{ м}$ .

Проверим верность вычислений:

$$P_{\text{м.расч}} = \left( 1 + \frac{1,1}{0,523 + \frac{0,0115}{0,017}} \right) \cdot (407 \cdot (10 - (-25))) = 27305 \text{ Вт.}$$

Так как  $P_m = 27400 \text{ Вт}$ , а расчетный тепловой поток равен  $27305 \text{ Вт}$ , то определение толщины мата из минеральной ваты выполнено правильно.

### Контрольные задания

1. Определить мощность для обогрева квартала парников. Число парников  $n=10$ , число рам в парнике  $m=20$ , размеры рам  $a \times b = 1,6 \times 1,2 \text{ м}$ . Температура внутри парника  $t_{\text{вн}} = 18^\circ\text{C}$ ; средняя температура самого холодного месяца в период эксплуатации  $t_{\text{ср}} = -12^\circ\text{C}$ ; минимальная температура наиболее холодного месяца данной климатической зоны  $t_{\text{мин}} = -20^\circ\text{C}$ . Рамы имеют двойное остекление. Исходные параметры ограждений и характеристики материалов:  $n_c = 2$ ;  $\alpha_c = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $C = 1,1$ ;  $\alpha_{\text{вн}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_{\text{н}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta_c = 0,002 \text{ м}$ ;  $\lambda_c = 0,745 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta_{\text{б}} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda_{\text{б}} = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2. При сильных морозах, для того чтобы не увеличивать установленную мощность нагревателей парников, рамы закрывают теплоизоляционными матами. Площадь парника  $450 \text{ м}^2$ ; рамы имеют двойное остекление. Расчетные параметры ограждений и характеристики материалов следующие:  $n_c = 2$ ;  $\alpha_c = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $C = 1,1$ ;  $\alpha_{\text{вн}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_{\text{н}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta_c = 0,002 \text{ м}$ ;  $\lambda_c = 0,745 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta_{\text{б}} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda_{\text{б}} = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Температура внутри парника  $t_{\text{вн}} = 16^\circ\text{C}$ ; средняя температура самого холодного месяца в период эксплуатации  $t_{\text{ср}} = -12^\circ\text{C}$ ; минимальная температура наиболее холодного месяца данной климатической зоны  $t_{\text{мин}} = -15^\circ\text{C}$ . Какой толщины необходим мат из минеральной ваты ( $\lambda_{\text{б}} = 0,017 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ),

чтобы сохранить тепловой поток потерь в окружающую среду  $P_m = 25000$  Вт при снижении температуры до минус  $25^\circ\text{C}$ .

3. Квартал парников насчитывает  $m=240$  рам (12 штук 20-рамных парников). Застекленная площадь парников составляет  $408 \text{ м}^2$ . Климатические условия эксплуатации: наиболее холодный месяц – февраль со средней температурой  $t_{cp} = -10^\circ\text{C}$  и минимальной температурой  $t_{min} = -30^\circ\text{C}$ , температура внутри парника должна быть  $t_{вн} = 18^\circ\text{C}$ . Необходимо определить длину стальной катанки для обогрева, если погонная мощность  $\Delta P = 30$  Вт/м, а удельный тепловой поток тепловых потерь составляет  $\alpha = 4 \dots 6$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

### Контрольные вопросы

1. Какой должна быть мощность установок для электрообогрева теплиц и парников?
2. От чего зависит коэффициент теплоотдачи парника в окружающую среду?
3. При каком условии температура внутри парника  $t_{вн}$  будет устойчива?
4. От чего зависит коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к наружному?
5. Что включает в себя задача расчета электрообогрева, какие данные используются в качестве исходных?
6. Как определяется расчетная наружная температура самого холодного месяца в период эксплуатации?
7. Что представляет собой расчет мощности электрообогревательной установки?
8. В чем заключается проверка результатов расчета?
9. Как регулируется температура почвы и воздушной среды в парниках?

## 8. Индукционный и диэлектрический нагрев

### 8.1. Общие сведения из теории расчета установок индукционного нагрева

Индукционный нагрев осуществляется в переменном магнитном поле. Проводники, помещенные в электромагнитное поле, нагреваются вихревыми токами, наводимыми в них по закону электромагнитной индукции.

Интенсивный нагрев можно получить лишь в полях высокой напряженности и частоты, которые создаются специальными устройствами – индукторами (индукционными нагревателями), питаемыми от сети или индивидуальных генераторов токов высокой частоты. Индуктор следует считать первичной обмоткой воздушного трансформатора, вторичной обмоткой которого служит нагреваемое тело. Любой индуктор состоит из следующих частей: индуктирующего провода, который создает магнитное поле, необходимое для индуктирования тока в нагреваемой детали; токоподводящих шин; колодок, служащих для соединения индуктора с понижающим трансформатором; устройства для подачи воды, охлаждающей индуктор и нагреваемую деталь с целью ее закалки. Основной же частью индуктора является индуктирующий провод, конструкция которого в значительной степени определяет результат нагрева или закалки.

В зависимости от применяемых частот установки индукционного нагрева разделяют на установки:

- 1) низкой (промышленной) частоты – 50 Гц;
- 2) средней (повышенной) частоты – до 10 кГц;
- 3) высокой частоты – свыше 10 кГц.

Деление индукционного нагрева по частотным диапазонам диктуется техническими и технологическими соображениями, а физическая сущность и общие количественные закономерности для всех частот одинаковы. Частота оказывает существенное влияние на интенсивность и характер нагрева.

Глубина проникновения электромагнитной волны в металл находится по приближенной формуле Штейнметца следующего вида:

$$z_0 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}, \quad (8.1)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала, которая зависит от напряженности магнитного поля, Гн/м;  $f$  – частота переменного тока, Гц.

Глубина проникновения тока изменяется в зависимости от температуры металла, поскольку по мере нагрева значение  $\rho$  увеличивается, а  $\mu_r$  уменьшается. Для стали значение  $\mu_r$  резко снижается при прохождении точки магнитного превращения, примерно равной 780°C, выше которой  $\mu_r = 1$  (при комнатной температуре  $\mu_r = 100 \dots 200$ ). Поэтому глубина проникновения с ростом температуры увеличивается. При «горячем режиме», т.е. при температуре свыше 780°C, глубина проникновения может быть принята за глубину нагрева. При поверхностной закалке глубина закаливаемого слоя составляет около половины значения горячей глубины проникновения токов, т.е. 40...50%.

Излучаемая индуктором электромагнитная волна падает на металлическое тело и, поглощаясь в нем, вызывает нагрев. Индуктированный ток сосредотачивается в полосе, ширина которой близка к ширине индуктора. Соответственно этому и ширина нагретой полосы также мало отличается от ширины индуктора.

Мощность потока энергии, протекающего через единицу поверхности тела, представляет собой удельную поверхностную мощность  $\Delta P$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$\Delta P = 2\pi \cdot J \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} = 2\pi \cdot J \cdot K_n, \quad (8.2)$$

где  $J$  – настил тока, А/м;  $K_n = \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f}$  – коэффициент поглощения мощности в материале.

В задачу расчета индукционных нагревательных установок входит определение параметров схемы замещения (рис. 8.1), составленной исходя из того, что индукционная установка промышленной частоты представляет собой воздушный трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания.

Параметры нагреваемых деталей в переменном магнитном поле:

– активное сопротивление вихревым токам  $r_m$ , Ом:

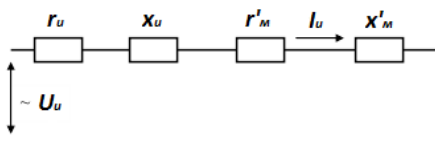
$$r_m = \rho_m \cdot \frac{l_{em}}{F_{em}}, \quad (8.3)$$

где  $l_{em}$  – длина пути вихревых токов по поверхности детали, м;  $F_{em}$  – площадь поперечного сечения вихревых токов, м<sup>2</sup>;  $\rho_m$  – удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлена деталь, Ом·м;

– индуктивное сопротивление  $x_m$ , Ом детали вихревым токам:

$$x_m = \omega \cdot L_m, \quad (8.4)$$

где  $\omega$  – угловая частота электромагнитной волны, с<sup>-1</sup>;  $L_m$  – индуктивность соленоида, образованного вихревыми токами, Гн.



**Рис. 8.1.** Схема замещения индукционной нагревательной установки промышленной частоты

Индуктивность соленоида, образуемого вихревыми токами,  $L_m$ , Гн:

$$L_m = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot F_{mf} \cdot w_m^2}{h} \cdot K_c, \quad (8.5)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu_0 = 7,4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $F_{mf}$  – площадь поперечного сечения магнитного потока в нагреваемой детали, м<sup>2</sup>;  $w_m$  – 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:

– активное сопротивление  $r_u$ , Ом:

$$r_u = \rho_u \cdot \frac{l_{np}}{F_{np}}, \quad (8.6)$$

где  $\rho_u$  – удельное электрическое сопротивление провода индуктора, Ом·м;  $l_{np}$  – длина индуктирующего элемента (провода), м;  $F_{np}$  – площадь поперечного сечения индуктирующего элемента (провода), м<sup>2</sup>;

– индуктивное сопротивление  $x_u$ , Ом:

$$x_u = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot F_{uf} \cdot w_u^2}{h_u} \cdot K_u, \quad (8.7)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $F_{uf}$  – площадь сечения зазора между индуктором и нагреваемой деталью, м<sup>2</sup>;  $w_u$  – число витков

индуктора;  $h_u$  – высота индуктора, м;  $K_u$  – коэффициент соленоида, образованного индуктором.

### Алгоритм расчёта индукторов промышленной частоты.

Определяются электрические параметры нагреваемого материала: активное сопротивление вихревым токам  $r_m$  по (8.3) и индуктивное сопротивление  $x_m$  (8.4), а также полное сопротивление материала  $z_m$ , Ом :

$$z_m = \sqrt{r_m + x_m}. \quad (8.8)$$

Действующее значение вихревого тока в нагреваемом теле  $I_e$ , А:

$$I_e = \sqrt{\frac{P_{mp}}{r_m}}, \quad (8.9)$$

где  $P_{mp}$  – требуемая мощность нагрева, которую необходимо выделить в нагреваемой детали, которая определяется на основе уравнения теплового баланса, Вт.

Удельная ЭДС, приходящаяся на один виток, или ЭДС, обеспечивающая протекание требуемого вихревого тока,  $e$ , В/вит:

$$e = I_e \cdot z_m. \quad (8.10)$$

Ориентировочно число витков обмотки индуктора  $w_u$ , шт.:

$$w_u = \frac{U_u}{e}, \quad (8.11)$$

где  $U_e$  – напряжение индуктора, В.

Ток индуктора (ориентировочный)  $I_u$ , А:

$$I_u = \frac{I_e}{w_u}. \quad (8.12)$$

Сечение провода индуктора по условиям нагрева  $F_{np}$ , мм<sup>2</sup>:

$$F_{np} = \frac{I_u}{j_{дон}}, \quad (8.13)$$

где  $j_{дон}$  – допустимая плотность тока для материала индуктирующего элемента, А/мм<sup>2</sup>.

Чаще всего индуктирующий элемент выполняется из меди, реже – из алюминия.

Длина провода индуктора  $l_{np}$ , м:

$$l_{np} = w_u \cdot l_{вит}, \quad (8.14)$$

где  $l_{вит}$  – длина одного витка обмотки, м.

При известном межвитковом расстоянии  $h$ , м, длина одного витка  $l_{вит}$ , м, определится по формуле

$$l_{вит} = \sqrt{(\pi \cdot D_u)^2 + h^2}, \quad (8.15)$$

где  $D_u$  – диаметр индуктора, м.

Принимая величина воздушного зазора между нагреваемым телом и индуктором  $a = 0,05$  м. Диаметр индуктора  $D_u$ , м, находят по формуле

$$D_u = d + 2 \cdot a + d_{np}, \quad (8.16)$$

где  $d$  – диаметр нагреваемой детали круглого сечения, м;  $d_{np}$  – диаметр провода индуктора, которая определяется по известному сечению индуктирующего элемента, м.

Определяются параметры  $r_u$ ,  $x_u$ ,  $z_u$ , Ом, обмотки индуктора по приведенным соотношениям.

Исходя из теории воздушного трансформатора, определяются приведённые параметры нагреваемого материала (детали):

$$r'_m = r_m \cdot w_u^2; \quad x'_m = x_m \cdot w_u^2. \quad (8.17)$$

Действительный ток  $I_{u(\phi)}$ , А, в индукторе:

$$I_{u(\phi)} = \frac{U_u}{\sqrt{(x_u + x'_m)^2 + (r_u + r'_m)^2}}, \quad (8.18)$$

где  $U_u$  – напряжения индуктора, В.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  индукционной нагревательной установки:

$$\cos\varphi = \frac{r_u + r'_m}{\sqrt{(x_u + x'_m)^2 + (r_u + r'_m)^2}}. \quad (8.19)$$

Из выражения (8.19) 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  $\cos\varphi = 0,707$ .

Коэффициент полезного действия индукционной нагревательной установки  $\eta$ :

$$\eta = \frac{r'_m}{r_u + r'_m}. \quad (8.20)$$



## Алгоритм расчётов индукционных нагревателей средней и высокой частоты.

К индукционным нагревательным установкам средней частоты относятся установки, работающие в диапазоне частот  $f = 160 \dots 10000$  Гц, высокой частоты –  $f > 10$  кГц.

Выбор генератора высокочастотного излучения (ВЧИ) производится по монограммам удельной поверхностной мощности  $\Delta P$ , Вт/см<sup>2</sup>, индукционного нагрева в зависимости от предполагаемого графика подвода мощности в функции толщины закаливаемого слоя  $\Delta$ , мм (рис. 8.2, 8.3).

Определяется средняя мощность  $P_{cp}$ , Вт, выделяющаяся в нагреваемой детали:

$$P_{cp} = \Delta P \cdot F_3, \quad (8.21)$$

где  $\Delta P$  – принятое по номограммам оптимальное значение удельной поверхностной мощности, Вт/см<sup>2</sup>;  $F_3$  – площадь поверхности, подвергающаяся одновременному нагреву, закаливанию, см<sup>2</sup>.

Мощность, потребляемая генератором из сети  $P_z$ , кВт:

$$P_z = \frac{P_{cp}}{\eta_u \cdot \eta_{mp} \cdot \eta_z}, \quad (8.22)$$

где  $\eta_u$  – КПД индуктора; обычно принимается  $\eta_u = 0,4 \dots 0,8$  в зависимости от диаметра нагреваемых заготовок;  $\eta_{mp}$  – КПД воздушного трансформатора;  $\eta_{mp} = 0,7 \dots 0,9$ ;  $\eta_z$  – КПД ВЧИ генератора;  $\eta_z = 0,7$ .

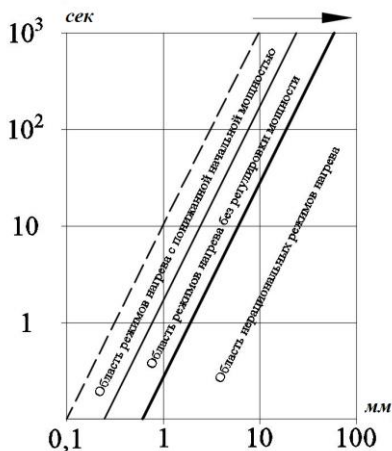
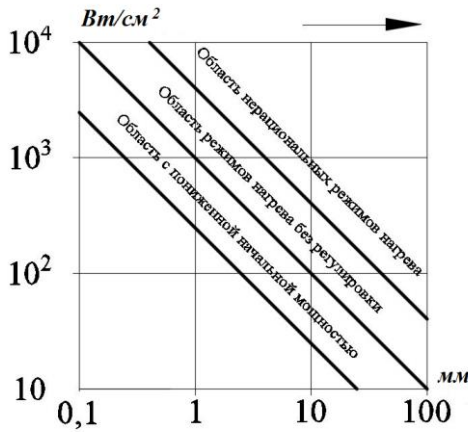


Рис. 8.2. Зависимость длительности нагрева  $\tau$ , с, от толщины закаливаемого слоя  $\Delta$ , мм



**Рис. 8.3.** Зависимость средней удельной поверхностной мощности  $\Delta P$ , Вт/см<sup>2</sup>, от толщины закаливаемого слоя  $\Delta$ , мм

Выбор оптимальной частоты  $f$ , Гц, производится по двум условиям:

– по условию обеспечения высокого КПД, которому соответствует соотношение  $\frac{R}{z_0} \geq (5...10)$ :

$$f = 6 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_m}{\mu_r \cdot R^2}, \quad (8.23)$$

где  $\rho_m$  – удельное электрическое сопротивление материала нагреваемой детали, Ом·м;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $R$  – радиус цилиндрической детали, м.

– по необходимой толщине закалённого слоя  $\Delta_k$ , м, в соответствии с чем должно соблюдаться условие  $z_0 = \Delta_k$ , частота  $f$ , Гц:

$$f = 2,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\rho_m}{\Delta_k^2}. \quad (8.24)$$

Эмпирические формулы, используемые на практике для определения частоты  $f$ , Гц:

– для деталей простейшей формы:

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{\Delta_k^2}; \quad (8.25)$$

– для деталей сложной формы:

$$f = \frac{5 \cdot 10^5}{\Delta_{\kappa}^2}; \quad (8.26)$$

– для сквозного нагрева цилиндрических деталей диаметром  $d$ , м:

$$f = \frac{3 \cdot 10^6}{d^2}. \quad (8.27)$$

В эмпирических формулах  $\Delta$  и  $d$  следует выражать в миллиметрах.

Расчет индуктора начинается с определения длины ленты индуктора  $l_u$ , м:

$$l_u = \frac{U_u}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot a \cdot K_u} \cdot \sqrt{\frac{K_n}{\Delta P_{онм} \cdot 503}}, \quad (8.28)$$

где  $U_u$  – напряжение на индукторе, В;  $a$  – воздушный зазор между деталью и лентой индуктора, м;  $K_u$  – соленоидный коэффициент индуктора.

Ширина ленты индуктора  $b_u$ , м:

$$b_u = \frac{F_2}{l_u}. \quad (8.29)$$

Прочие конструктивные размеры рассчитываются, исходя из размеров и формы нагреваемой детали. Размеры индуктора описываются параметром  $al$ , м<sup>2</sup>:

$$al = 1,78 \cdot 10^5 \cdot U_u \cdot \Delta P^{\frac{1}{2}} \cdot [\rho \cdot \mu]^{1/4} \cdot f^{-\frac{3}{4}}. \quad (8.30)$$

Для углеродистой стали в холодном состоянии  $\rho = 10^{-5}$  Ом·см,  $\mu = 100$ ; в нагретом до температуры 780...800°C состоянии  $\rho = 10^{-4}$  Ом·см,  $\mu = 1$ . Тогда:

– для холодного состояния:

$$al = 3,18 \cdot 10^4 \cdot U_u \cdot \Delta P^{\frac{1}{2}} \cdot f^{-\frac{3}{4}}; \quad (8.31)$$

– для нагретого состояния:

$$al = 1,78 \cdot 10^4 \cdot U_u \cdot \Delta P^{\frac{1}{2}} \cdot f^{-\frac{3}{4}}. \quad (8.32)$$

Значение  $U_u$  при поверхностной закалке находится в пределах 50...100 В, а при сквозном нагреве 100...250 В. Формулы (8.31) и (8.32) позволяют найти любую из входящих в них величин при известных других.

К показателям экономичности установок относятся:

– коэффициент полезного действия ВЧИ нагрева  $\eta_u$ :

$$\eta_u = \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_m} \cdot \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_m \cdot \mu_{gm}}}}, \quad (8.33)$$

$$\eta_{u\max} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_m \cdot \mu_{gm}}}}, \quad (8.34)$$

где  $R_u$  – радиус индуктора, м;  $R_m$  – радиус нагреваемой детали, м;  $\rho_u$  – удельное сопротивление материала индуктора, Ом·м;  $\rho_m$  – удельное сопротивление материала нагреваемой детали, Ом·м;  $\mu_{gm}$  – относительная магнитная проницаемость материала детали;

– коэффициент мощности  $\cos\varphi$  индукционных нагревательных установок средней и высокой частот:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{a \cdot \sqrt{2}}{z_0 \cdot \mu_{am}}\right)^2}}, \quad (8.35)$$

где  $a$  – воздушный зазор, м;  $z_0$  – глубина проникновения электромагнитной волны в материал, м;  $\mu_{am}$  – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

Так как коэффициент мощности индукционных нагревательных установок низок, а в процессе нагрева он может снизиться до  $\cos\varphi = 0,01 \dots 0,1$ , устанавливают компенсирующее устройство, емкость конденсаторов  $C$ , Ф, которого:

$$C = \frac{P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{2\pi \cdot f \cdot U_u^2}, \quad (8.36)$$

где  $P$  – активная мощность индуктора, Вт;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – угол сдвига между током и напряжением до и после компенсации.

## 8.2. Общие сведения из теории расчета установок 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: древесина, фрукты, овощи, чай, табак, зерновые культуры и др. Нагреваемый материал помещается между

обкладками высокочастотного конденсатора, то есть камерой нагрева является рабочий конденсатор.

Установки диэлектрического нагрева характеризуются удельной объемной мощностью  $\Delta P_V$ , Вт/м<sup>3</sup>, то есть мощностью, выделяемой в единице объема нагреваемого материала, которая определяется выражениями:

$$\Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (8.37)$$

или

$$\Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot K_n, \quad (8.38)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в диэлектрике, В/м;  $f$  – частота электрического поля, Гц;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого материала;  $K_n$  – коэффициент поглощения мощности материалом (фактор потерь диэлектрика).

Коэффициент поглощения мощности материалом  $K_n$ :

$$K_n = \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (8.39)$$

Параметры схемы замещения установки диэлектрического нагрева:

– емкостное сопротивление плоского рабочего конденсатора  $X_k$ , Ом:

$$X_k = \frac{1}{\omega \cdot C_k} = \frac{l}{2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot F}, \quad (8.40)$$

где  $\omega$  – угловая частота переменного электрического поля, с<sup>-1</sup>;  $C_k$  – емкость конденсатора (воздушного), Ф;  $l$  – расстояние между обкладками конденсатора, м;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $F$  – площадь обкладки конденсатора, м<sup>2</sup>;

– емкостное сопротивление, вносимое нагреваемым материалом  $X_m$ , Ом:

$$X_m = \frac{1}{\omega \cdot C_m} = \frac{l}{2\pi \cdot f \cdot (\varepsilon - 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot F}, \quad (8.41)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала;

– активное сопротивление материала, определяемое по выделению теплоты в материале,  $r_m$ , Ом:

$$r_m = 1,8 \cdot 10^{10} \frac{l}{K_n \cdot f \cdot F}. \quad (8.42)$$

Общая емкость установки диэлектрического нагрева  $C_y$ , Ф:

$$C_y = C_k + C_m = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{l}{F}. \quad (8.43)$$

Критическая частота при диэлектрическом нагреве материалов, при которой происходит срыв колебаний и снижение мощности нагрева,  $f_0$ , Гц:

$$f_0 = \frac{k \cdot T}{8\pi^2 \cdot R^3 \cdot \xi}, \quad (8.44)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – абсолютная температура нагрева, К;  $\xi$  – абсолютная вязкость материала, кг/(м·с);  $R$  – радиус полярной молекулы, м.

Выбор напряженности электрического поля  $E$ , В/м, производится с учетом значения напряженности электрического пробоя  $E_{np}$ , В/м, диэлектрика:

$$E = \frac{E_{np}}{1,5 \dots 2,0}. \quad (8.45)$$

Электрическая прочность при нагреве и сушке различных материалов, используемых в сельском хозяйстве, обычно не превышает 1,5...2,0 кВ/см.

Мощность преобразователя частоты определяется с учетом допустимой объемной мощности при ограничении скорости нагрева  $\Delta P_{V\partial}$ , Вт/м<sup>3</sup>:

$$\Delta P_{V\partial} = \frac{\delta \cdot c}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau}, \quad (8.46)$$

где  $\delta$  – плотность нагреваемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная массовая теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);  $\eta_k$  – КПД рабочего конденсатора; принимается  $\eta_k = 0,8 \dots 0,9$ ;  $(\Delta t / \Delta \tau)$  – допустимая скорость изменения температуры диэлектрика, °С/с.

Допустимая объемная мощность при ограничении скорости испарения влаги (сушке)  $\Delta P_{V\partial}$ , Вт/м<sup>3</sup>:

$$\Delta P_{V\partial} = \frac{w_{вл} \cdot a_n}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau \cdot 100}, \quad (8.47)$$

где  $w_{вл}$  – влагосодержание одного м<sup>3</sup> материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a_n$  – удельная теплота испарения влаги (парообразования), кДж/кг;  $(\Delta \varphi / \Delta \tau)$  – допустимая скорость изменения относительной влажности диэлектрика, %/с.

Мощность рабочего конденсатора (максимальная),  $P_k$ , кВт:

$$P_k = \Delta P_V \cdot V, \quad (8.48)$$

где  $V$  – объем нагреваемого материала, м<sup>3</sup>.

Колебательная мощность генератора (парообразователя),  $P_z$ , кВт:

$$P_z = \frac{P_k}{\eta_z \cdot \eta_l}, \quad (8.49)$$

где  $\eta_z$  – электрический КПД колебательного контура;  $\eta_z=0,65\dots0,7$ ;  $\eta_l$  – КПД линии, учитывающий потери в проводниках, соединяющих генератор с колебательным контуром;  $\eta_l=0,9\dots0,95$ .

Мощность, потребляемая генератором из сети,  $P$ , кВт:

$$P = \frac{P_n}{\eta_k \cdot \eta_z \cdot \eta_l \cdot \eta_g}, \quad (8.50)$$

где  $\eta_g$  – КПД генератора;  $\eta_g = 0,55\dots0,75$ .

Общий КПД диэлектрической нагревательной установки:

$$\eta_{общ} = \eta_k \cdot \eta_z \cdot \eta_l \cdot \eta_g. \quad (8.51)$$

В результате многократного преобразования энергии общий КПД установок диэлектрического нагрева оказывается довольно низким –  $0,3\dots0,45$ , а удельный расход электрической энергии высоким.

Выбор частоты  $f$ , Гц, диэлектрического нагрева производится для двух режимов: нагрева и сушки сельскохозяйственной продукции.

Максимальное значение частоты по допустимой скорости нагрева  $f$ , Гц:

$$f = \frac{\delta \cdot c}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot K_n \cdot E^2}, \quad (8.52)$$

где  $K_n$  – коэффициент поглощения мощности материалом, так называемый фактор потерь диэлектрика.

Максимальное значение частоты по допустимой скорости испарения  $f$ , Гц:

$$f = \frac{w_{вл} \cdot a_n}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau \cdot 100} \cdot \frac{1}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot K_n \cdot E^2}. \quad (8.53)$$

Выбирается ближайшая меньшая из разрешенных в технике частот.

Расчет размеров камеры нагрева (рабочего конденсатора):  
 – объем камеры нагрева  $V_{\kappa}$ , м<sup>3</sup>, принимается на 20% больше объема нагреваемого материала:

$$V_{\kappa} = 1,2 \cdot V; \quad (8.54)$$

– расстояние между обкладками конденсатора  $l$ , м:

$$l = \frac{V_{\kappa}}{E}, \quad (8.55)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;

– площадь обкладок для плоского конденсатора  $F$ , м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{V_{\kappa}}{l}. \quad (8.56)$$

Размеры сторон обкладок задаются произвольно, в зависимости от требований технологии.

Рассмотрим в качестве примера диэлектрического нагрева для сушки материалов процесс сушки зерна токами высокой частоты.

Удельная объемная мощность  $\Delta P_V$ , Вт/м<sup>3</sup>, необходимая для нагрева одного метра кубического материала:

$$\Delta P_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (8.57)$$

Удельный расход электроэнергии  $\Delta W_V$ , (кВт·ч)/(м<sup>3</sup>·ч) для нагрева одного метра кубического материала в течение одного часа:

$$\Delta W_V = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (8.58)$$

Удельный расход тепла  $\Delta q_V$ , кДж/(м<sup>3</sup>·ч):

$$\Delta q_V = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{\eta_m}. \quad (8.59)$$

Расход тепла  $q_{\text{прогр}}$ , кДж/м<sup>3</sup>, для прогрева единицы объема материала:

$$q_{\text{прогр}} = \delta_{\text{нр}} \cdot c_{\text{нр}} \cdot (t_{\kappa} - t_{\text{н}}), \quad (8.60)$$

где  $\delta_{\text{нр}}$  – плотность продукта кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{нр}}$  – удельная теплоемкость влажного продукта, кДж/(кг·°С);  $t_{\kappa}$  – начальная температура продукта, °С;  $t_{\text{н}}$  – конечная температура продукта, °С.

Расход тепла  $q_{\text{исп}}$ , кДж/м<sup>3</sup>, на испарение свободной влаги:

$$q_{\text{исп}} = a_n \cdot \delta_{\text{нр}} \cdot \frac{\varphi_{\text{н}} - \varphi_{\kappa}}{100 - w_{\kappa}}, \quad (8.61)$$



где  $a_n$  – теплота испарения свободной влаги, кДж/кг,  $a_n=2760$  кДж/кг;  $\varphi_n$  – начальная влажность продукта, %;  $\varphi_k$  – конечная влажность продукта, %;  $\eta_m$  – термический коэффициент полезного действия рабочего конденсата;  $\eta_m=0,7$ .

Расход электроэнергии  $\Delta W_V$ , (кВт·ч)/м<sup>3</sup>, на нагрев единицы объема продукта и испарение свободной влаги:

$$\Delta W_V = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{3600 \cdot \eta_m}. \quad (8.62)$$

Приравняем полученные выражения:

$$5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot \text{tg} \delta = \frac{q_{\text{прогр}} + q_{\text{исп}}}{3600 \cdot \eta_m}. \quad (8.63)$$

Задача состоит в определении частоты электрического поля  $f$ , Гц и напряженности  $E$ , В/м.

Принимается частота в средневолновом диапазоне с длиной волны 300 м, когда  $f = 1$  МГц и определяется нужная напряженность поля.

Из выражения расхода электроэнергии на единицу массы продукта расход электроэнергии на обработку одного килограмма  $\Delta W_m$ , (кВт·ч)/кг:

$$\Delta W_m = \frac{\Delta W_V}{\delta_{\text{пр}}}. \quad (8.64)$$

Расход электроэнергии  $\Delta W_{m\%}$ , кВт·ч/кг, %

$$\Delta W_{m\%} = \frac{\Delta W_m}{\varphi_n - \varphi_k}. \quad (8.65)$$

Пусть производительность сушилки  $m'$ , кг/ч, тогда потребная мощность  $P_{\text{номр}}$ , кВт на сушку:

$$P_{\text{номр}} = \frac{\Delta W_V \cdot m'}{\delta_{\text{пр}}}. \quad (8.66)$$

Мощность, потребляемая из сети,  $P$ , кВт:

$$P = \frac{P_{\text{номр}}}{\eta_{\text{общ}}}, \quad (8.67)$$

где  $\eta_{\text{общ}}$  – общий коэффициент полезного действия высокочастотной установки;  $\eta_{\text{общ}} = 0,5$ , который учитывает КПД лампового генератора, КПД колебательного контура.

## Примеры решения задач

**Задача 8.1.** Рассчитать индуктор и выбрать высокочастотную установку для поверхностной закалки цилиндрических заготовок из углеродистой стали диаметром  $d = 30$  мм и высотой  $h = 90$  мм. Глубина закаливаемого слоя  $\Delta\kappa = 1$  мм, напряжение на индукторе  $U_u = 100$  В.

### Решение

Рекомендуемая частота  $f$ , Гц:

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{\Delta\kappa^2} = \frac{5 \cdot 10^4}{1^2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

Ближайшая из применяемых в технике частот  $f = 67$  кГц.

По номограмме (рис. 8.3) выбирается оптимальная удельная поверхностная мощность  $\Delta P = 400$  Вт/см<sup>2</sup>, находится параметр  $al$ , см<sup>2</sup> для холодного состояния:

$$al = 3,18 \cdot 10^4 \cdot U_u \cdot \Delta P^{\frac{1}{2}} \cdot f^{-\frac{3}{4}} = 3,18 \cdot 10^4 \cdot \frac{100}{\sqrt{400}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{(67 \cdot 10^3)^3}} = 38,2 \text{ см}^2.$$

Величина воздушного зазора принимается  $a = 0,5$  см, тогда диаметр индуктора  $D_u$ , см:

$$D_u = d + 2 \cdot a = 3 + 2 \cdot 0,5 = 4 \text{ см.}$$

Длина индуктирующего элемента  $l_u$ , см:

$$l_u = \frac{al}{a} = \frac{38,2}{0,5} = 76,4 \text{ см.}$$

Число витков индуктора,  $w_u$ , шт.:

$$w_u = \frac{l}{\pi \cdot D_u} = \frac{76,4}{3,14 \cdot 4} = 6.$$

Высота индуктора  $h_u$ , см:

$$h_u = (1 \dots 1,2) \cdot h = (1 \dots 1,2) \cdot 9 = 10 \text{ см.}$$

Колебательная мощность генератора  $P_z$ , кВт:

$$P_z = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot d \cdot h_u \cdot 10^{-3}}{\eta_{mp} \cdot \eta_u} = \frac{400 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{0,88 \cdot 0,66} = 64,8 \text{ кВт.}$$

Следует выбрать высокочастотную установку, имеющую колебательную мощность 63 кВт и рабочую частоту 67 кГц.

**Задача 8.2.** Определить коэффициент мощности высокочастотной установки для поверхностной закалки цилиндрических заготовок из углеродистой стали диаметром  $d = 30$  мм и высотой  $h = 90$  мм. Глубина закаливаемого слоя  $\Delta_k = 1$  мм, напряжение на индукторе  $U_u = 100$  В, ток индуктора  $I_u = 3000$  А, КПД индуктора  $\eta_u = 0,66$ .

### Решение

Коэффициент мощности можно определить по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_u}{U_u \cdot I_u}.$$

По номограмме (рис. 8.3) принимаем значение удельной мощности  $\Delta P = 400$  Вт/см<sup>2</sup>.

Мощность, подводимая к индуктору:

$$P_u = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot d_3 \cdot h_3}{\eta_u} = \frac{400 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 9}{0,66} = 513818 \text{ Вт.}$$

Коэффициент мощности равен:

$$\cos\varphi = \frac{P_u}{U_u \cdot I_u} = \frac{513818}{100 \cdot 3000} = 0,171.$$

**Задача 8.3.** Определить мощность, необходимую для нагрева бруска пластмассы в установке диэлектрического нагрева. Брусек имеет размеры  $60 \times 300 \times 100$  мм и помещен в рабочую камеру диэлектрического нагрева. Относительная диэлектрическая проницаемость материала  $\varepsilon_r = 4$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $tq\delta = 0,03$ ; частота электрического поля  $f = 40,68$  МГц; напряженность электрического поля внутри бруска  $E = 0,8$  кВ/см.

### Решение

Плотность мощности в нагреваемой пластмассе:

$$\Delta P_V = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (80000)^2 \cdot 40,68 \cdot 10^6 \cdot 4 = 1736381,2 \text{ Вт/м}^3 = 1736,3 \text{ кВт/м}^3.$$

Объем нагреваемого бруска:

$$V = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^{-3} = 0,0018 \text{ м}^3.$$

Мощность, потребляемая установкой из сети:

$$P = \Delta P_V \cdot V = 17363 \cdot 0,0018 = 3,1 \text{ кВт.}$$

**Задача 8.4.** Определить время нагрева бруска пластмассы в установке диэлектрического нагрева. Брусочек пластмассы в форме параллелепипеда помещен в рабочую камеру для диэлектрического нагрева. Относительная диэлектрическая проницаемость материала  $\varepsilon_r = 4$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $tq\delta = 0,03$ ; частота электрического поля  $f = 40,68$  МГц  $= 40,68 \cdot 10^6$  Гц; напряженность электрического поля внутри бруска  $E = 80000$  В/м; КПД рабочей камеры  $\eta_k = 0,8$ ; плотность пластмассы  $\delta = 2000$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость пластмассы  $c = 2000$  Дж/(кг·°С). Начальная температура  $t_1 = 20$  °С, конечная  $t_2 = 100$  °С.

### Решение

Время нагрева бруска пластмассы от начальной температуры  $t_1$  до конечной  $t_2$  определим, используя уравнение энергетического баланса диэлектрического нагрева:

$$\frac{V \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta \cdot V \cdot \eta_k,$$

или

$$\frac{\rho \cdot \delta \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta \cdot \eta_k.$$

Время нагрева равно:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta \cdot \eta_k} = \\ &= \frac{2000 \cdot 2000 \cdot (100 - 20)}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (80000)^2 \cdot 40,68 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 0,03 \cdot 0,8} = 230,4 \text{ с} = \\ &= 3,8 \text{ мин.} \end{aligned}$$

**Задача 8.5.** На ремонтном предприятии требуется нагреть пластмассовую заготовку от температуры  $t_1 = 20$  °С до температуры  $t_2 = 80$  °С в рабочем конденсаторе установки для диэлектрического нагрева. Желаемое время нагрева  $\tau = 1$  мин. Частота электрического поля  $f = 40,68$  МГц. Свойства пластмассы: плотность  $\delta = 1900$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $c = 2100$  Дж/кг·°С, относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r = 6$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $tq\delta = 0,05$ . Чему должна быть равна напряженность электрического поля в нагреваемом материале?

## Решение

Полезный тепловой поток (полезную тепловую мощность) можно определить по формуле

$$\Phi_n = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = \frac{V \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}.$$

Однако полезный поток можно также выразить и через мощность  $P_\kappa$ , выделяемую в рабочем конденсаторе (т.е. в нагреваемом материале):

$$\Phi_n = P_\kappa \cdot \eta_\kappa.$$

Тепловой КПД рабочего конденсатора примем равным  $\eta_\kappa = 0,9$  (по справочным данным). Мощность  $P_\kappa$ , выделяемую в рабочем конденсаторе (т.е. в нагреваемом материале), можно определить через удельную объемную мощность  $P_V$  (Вт/м<sup>3</sup>), выделяемую в нагреваемом диэлектрике:

$$P_\kappa = \Delta P_V \cdot V.$$

Удельная объемная мощность в свою очередь может быть найдена как

$$\Delta P_V = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta.$$

Приравняв полученные ранее выражения для полезного теплового потока (полезной тепловой мощности) получим:

$$\frac{V \cdot \delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau} = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta \cdot V \cdot \eta_\kappa.$$

Получаем, что напряженность электрического поля в нагреваемом материале равна:

$$E = \sqrt{\frac{\delta \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot tq\delta \cdot \eta_\kappa \cdot \tau}} =$$
$$= \sqrt{\frac{1900 \cdot 2100 \cdot (80 - 20)}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 40,68 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 0,05 \cdot 0,9 \cdot 60}} = 0,81 \cdot 10^5 \frac{B}{м} = 0,81 \frac{kB}{см}.$$

## Контрольные задания

1. Определить время нагрева детали в установке индукционного нагрева. Начальная температура 300 К, конечная – 500 К. Количество заготовок, нагреваемых в индукторе, 8, каждая массой 0,9 кг. Средняя удельная теплоёмкость материала заготовок в этом интервале температур 18,7 Дж/(кг·К). Коэффициент полезного действия индуктора 0,8;

КПД конденсаторной батареи 0,78; КПД линии 0,84; КПД источника питания 0,9.

2. Рассчитать индукционную нагревательную установку 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  $\mu_r = 100$ , через которую подается вода с начальной температурой  $t_1 = 2^\circ\text{C}$ , нагреваемая до температуры  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ , при подаче  $L = 50$  кг/ч. Допустимая плотность тока в индукторе  $j_{\text{дон}} = 5$  А/мм<sup>2</sup>. Начертить схему замещения и векторную диаграмму индукционной нагревательной установки. Термический КПД установки  $\eta_m = 0,6$ . Длина трубы, на которой выполнена намотка индуктора,  $h_u = 1$  м.

3. Индукционная нагревательная установка, выполненная в виде однослойной обмотки, наложена на водопроводную трубу диаметром  $d = 0,04$  м. Толщина стенки трубы  $\Delta = 2$  мм. Воздушный зазор между трубой и обмоткой  $a = 1$  мм. Число витков обмотки  $w_u = 200$  витков. Напряжение питания  $U = 220$  В. Металл трубы имеет удельное сопротивление  $\rho_{20} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, относительная магнитная проницаемость  $\mu_r = 250$ . Частота питающего тока  $f = 50$  Гц. Определить при какой подаче вода будет нагреваться на  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ , если известен КПД установки  $\eta_m = 0,85$ . Плотность тока в обмотке  $j = 7,5$  А/мм<sup>2</sup>. Построить векторную диаграмму.

4. Рассчитать индуктор для высокочастотной поверхностной закалки цилиндрических деталей диаметром  $d = 0,1$  м. Удельное сопротивление материала  $\rho_{20} = 1,9 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, магнитная проницаемость  $\mu_r = 100$ , требуемая толщина закаливаемого слоя  $\Delta = 5$  мм. Частоту выбрать из условий  $x_k = z_0$  и  $R/z_0 = 10$ . Воздушный зазор  $a = 3$  мм. Напряжение на индукторе  $U_u = 100$  В. Определить площадь одновременно закаливаемой поверхности  $F_3$ , м<sup>2</sup>, если известна потребляемая индуктором мощность  $P_u = 20$  кВт.

5. Определить мощность, выделяющуюся в диэлектрике между обкладками конденсатора, если известно, что ток смещения  $I_{\text{см}} = 30$  А и ток проводимости  $I_{\text{пр}} = 20$  А. Размеры пластин конденсатора:  $a = 0,5$  м;  $b = 0,3$  м. Напряжение, прикладываемое к пластинам,  $U = 380$  В, емкость конденсатора  $C = 0,8 \cdot 10^{-5}$  Ф, а расстояние между пластинами  $l = 0,1$  м.

6. Рассчитать установку диэлектрического нагрева для размораживания пищевых продуктов массой  $m = 1$  кг, влажностью  $\varphi = 70\%$ , начальная температура  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , конечная температура продукта  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Удельная теплоемкость продукта  $c = 2,8$  кДж/(кг·°C), удельная теплота плавления льда  $a_{\text{пл}} = 334$  кДж/кг; время размораживания  $\tau = 5$  мин, допустимая напряженность электрического поля  $E_{\text{дон}} = 5$  кВ/см; КПД —  $\eta = 0,5$ .

7. 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  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 75^\circ\text{C}$ . Требуемая производительность установки  $L = 120$  кг/ч.

Определить мощность и частоту генератора ВЧ, если известны допустимая напряженность электрического поля  $E_{дон} = 1,2$  кВ/см, плотность молока  $\delta = 985$  кг/м<sup>3</sup>, его удельная теплоемкость  $c = 4$  кДж/(кг·°С), диэлектрическая проницаемость (относительная)  $\epsilon_r = 75$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg = 0,023$ .

8. Определить мощность, выделяемую в рабочем конденсаторе при нагреве деревянного блока площадью  $F = 2$  м<sup>2</sup> и толщиной  $\Delta = 0,05$  м. Относительная диэлектрическая проницаемость дерева  $\epsilon_r = 6$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta = 0,25$ ; частота  $f = 300$  МГц; напряженность поля  $E = 20$  кВ/м.

### Контрольные вопросы

1. Какова физическая природа индукционного нагрева?
2. Для каких тепловых процессов перспективно использование токов высокой частоты?
3. Назначение, классификация и конструктивное исполнение индукторов.
4. Основные характеристики системы «индуктор-изделие».
5. Почему электрический КПД установок индукционного нагрева достаточно низок?
6. От каких параметров зависит коэффициент полезного действия установок индукционного нагрева?
7. Что такое поверхностная мощность при индукционном нагреве?
8. Как осуществляется выбор частоты индукционного нагрева?
9. В чем заключается задача расчета индуктора?
10. Как рассчитать мощность индуктора?
11. Как определить количество витков, диаметр и высоту индуктора?
12. Что такое и как определяется глубина проникновения тока?
13. Факторы, влияющие на глубину проникновения электромагнитной волны в проводник.
14. В каких технологических процессах целесообразно применение диэлектрического нагрева?
15. Объясните механизм процесса высокочастотной сушки полупроводниковых материалов и перечислите преимущества этого метода.
16. Объясните физическую сущность нагрева полупроводников и диэлектриков в электрическом поле высокой частоты.
17. Каким образом может быть осуществлен селективный нагрев неоднородного диэлектрика в электрическом поле высокой частоты?
18. В чем заключаются условия правильного выбора частоты электрического поля при диэлектрическом нагреве?
19. От каких параметров зависит удельная объемная мощность при диэлектрическом нагреве? По какому признаку осуществляется классификация установок диэлектрического нагрева?

## **9. Расчет и выбор электротермических установок, используемых в сельскохозяйственном производстве**

### **9.1. Общие сведения об электротермических установках сельскохозяйственного назначения**

Электротермические установки имеют довольно сложное оборудование, включающее в себя: электрические печи, плазменные реакторы, нагревательные установки, приборы промышленного, коммунального и бытового назначения и т.п. Электротермические установки применяют в следующих случаях: 1) если технологический процесс нельзя осуществить без электротермии (в этом случае целесообразность определяется технологическими требованиями и качеством получаемой продукции как в промышленности, так и в сельском хозяйстве); 2) можно получить продукцию более высокого качества; 3) улучшаются условия труда, повышается безопасность обслуживающего персонала; 4) достигается снижение себестоимости (благодаря более высокой производительности труда) или уменьшение капитальных затрат, включая затраты в смежных отраслях производства. Агропромышленный сектор представляет собой крупного потребителя тепловой энергии, основная часть которой тратится на различные технологические нужды. Низкотемпературный электронагрев является наиболее распространенным в сельском хозяйстве.

Сельскохозяйственным предприятиям, как объектам теплоснабжения, присущи характерные особенности, к которым в первую очередь следует отнести: 1) низкую плотность тепловых нагрузок и большую рассредоточенность потребителей, что обуславливает широкое распространение децентрализованных систем теплоснабжения; 2) большую неравномерность нагрузки и малый коэффициент использования её максимума, что сопровождается перерасходом топлива в периоды провалов нагрузки; 3) недопустимость резких колебаний параметров микроклимата для нормального содержания и развития животных, птиц и растений.



Широкое применение электроэнергии для электрификации тепловых процессов сдерживается недостаточной мощностью электрических станций и пропускной способностью сельских сетей, ограниченной номенклатурой и объемом выпускаемого электротермического оборудования, а также не всегда грамотным решением вопросов применения электрического нагрева, что не позволяет получить от электронагрева максимальный экономический эффект. Инженерные расчеты показывают, что в случае рассредоточенности сельскохозяйственных объектов по достаточно большой территории, когда длина тепловых сетей более 0,5...0,6 км, а тепловая нагрузка не превышает 4000 кДж/м, экономически целесообразно применять местные (встроенные) котельные с источниками тепла малой производительности. Исходя из сказанного более целесообразно превращать электрическую энергию в тепловую децентрализованно, максимально приблизив этот процесс к потребителю. До недавнего времени считалось, что электронагрев сопровождается перерасходом энергетических ресурсов из-за потерь при двукратном преобразовании энергии топлива, то есть сначала в электрическую на электростанции, а затем в тепловую в электротермической установке. Однако в результате всесторонних исследований установлено, что при электронагреве первичные энергоресурсы, наоборот, часто экономятся.

Круг вопросов, которые должны решаться при выборе оптимального варианта электротеплоснабжения, кроме традиционных технологических, технических и экономических, включает также вопросы, связанные с изменением качества и количества производимой сельхозпродукции при различных системах теплоснабжения. Кроме того, необходимо учитывать технологические, социальные и экологические аспекты широкой электрификации тепловых процессов в сельском хозяйстве.

Повышается продуктивность животноводства и птицеводства, снижается падеж животных и удельный расход кормов. При технико-экономическом сравнении вариантов теплоснабжения необходимо учитывать эффект, который дает более «гибкий» энергоноситель – электричество. Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации электроотопительных установок показывает, что использование электрической энергии позволяет с большой точностью поддерживать необходимые микроклиматические условия в помещениях; на 15...20% увеличить суточные приросты массы при

откорме скота, снизить на 20...25% расход кормов; снизить на 10...15% падеж молодняка и увеличить на 30% яйценоскость кур. Быт сельских жителей приближается к городскому с точки зрения повышения комфортности, уменьшения трудозатрат и зависимости от особенностей традиционных систем теплоснабжения.

Использование тепловых нагрузок в качестве потребителей – регуляторов электрических графиков нагрузки – является чрезвычайно эффективным. В сельском хозяйстве коэффициенты использования установленной мощности и коэффициенты заполнения суточных графиков весьма низки как в зимнее, так и в летнее время. Применение электрической энергии в тепловых процессах способствует выравниванию графика общего электропотребления хозяйств и лучшему использованию электросетевого оборудования, тем более, что инструкция РД 34.26.103 «Инструкция о порядке согласования применения электродкотлов и других электронагревательных приборов» устанавливает, что электрические нагревательные установки должны работать, как правило, в часы провалов графиков нагрузок энергосистемы, в основном в ночное время, и по возможности комплектоваться тепловыми аккумуляторами.

При электротеплоснабжении уменьшается стоимость передачи электрической энергии от районной подстанции к потребителю с увеличением электропотребления в хозяйствах.

Та же инструкция РД 34.26.103 устанавливает, что мелким сельскохозяйственным потребителям производственного назначения с общей площадью помещений до 100 м<sup>2</sup> (вагоны-бытовки, чабанские домики, мастерские, конторы складов, насосные артезианские скважины, станции орошения, очистные сооружения, автозаправочные станции и др.), удаленным от источников тепла на 600 м и более с общей установленной мощностью электронагревательных приборов до 30 кВт включительно разрешается использовать электроэнергию для отопления и горячего водоснабжения, а энергонадзорным органам выдавать разрешения без представления технико-экономического обоснования.

Для осуществления тепловых технологических процессов спроектировано и разработано необходимое, достаточно большое количество различного типа теплоэнергетического оборудования – топливного и электротеплового, на базе которых формируются системы теплообеспечения. Однако производство и поставка отечественного теплоэнергетического оборудования и обеспечен-

ность им производственных объектов (в частности, животноводческих ферм) весьма низкая и составляет менее 40%.

### Примеры решения задач

**Задача 9.1.** Выбрать электрический водонагреватель и теплоаккумулирующую емкость мини-котельной сельскохозяйственного объекта, теплотребление которого задано следующими данными ( $\Phi_{max}$  – максимальный тепловой поток,  $\Phi_{max}= 100$  кВт), представленными в таблице 9.1.

Таблица 9.1

#### Относительное теплотребление в зависимости от интервала времени

Показатели	<i>i</i> интервал времени							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Относительное теплотребление $K_i = \Phi_i/\Phi_{max}$	0,25	0,4	0,7	1,0	0,5	0,35	0,8	0,2
Интервал времени $\tau$ , ч	3,4	3,6	2,0	3,2	3,0	4,4	3,2	1,2

Коэффициент запаса  $k_3=1,1$ ; КПД нагревателя  $\eta_n=0,96$ ; КПД аккумулятора  $\eta_{ак}=0,94$ ; время разрешенной работы водонагревателя  $\tau_{зар}=6$  ч; начальная температура воды  $t_1=10^\circ\text{C}$ , конечная –  $t_2=95^\circ\text{C}$ . Плотность воды  $\delta=1000$  кг/м<sup>3</sup>; удельная теплоемкость воды  $c=4,19$  (кДж/кг·°C). Определить мощность и тип электрического водонагревателя, вместимость теплоаккумулирующего бака, пределы необходимого регулирования мощности нагревателя.

### Решение

Мощность водонагревателя для зарядки аккумулирующей емкости найдем по формуле

$$P_n = \frac{k_3 \cdot \left( \sum_{i=1}^8 \Phi_i \cdot \tau_i \right)}{\eta_n \cdot \eta_{ак} \cdot \tau_{зар}} = \frac{k_3 \cdot (K_1 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_1 + K_2 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_2 + K_3 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_3 + K_4 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_4 + K_5 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_5 + K_6 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_6 + K_7 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_7 + K_8 \cdot \Phi_{max} \cdot \tau_8)}{\eta_n \cdot \eta_{ак} \cdot \tau_{зар}} = \frac{1,1 \cdot (85 + 144 + 140 + 320 + 150 + 154 + 256 + 24)}{0,96 \cdot 0,94 \cdot 6} = \frac{1,1 \cdot 1273}{0,96 \cdot 0,94 \cdot 6} = 259,3 \text{ кВт.}$$

Принимаем мощность водонагревателя  $P_{ном}=250$  кВт и тип водонагревателя – электродный ЭПЗ-250 (табл. П. 24).

Определяем вместимость бака-аккумулятора, воспользовавшись выражением:

$$V_{ак} = \frac{k_3 \cdot \left( \sum_{i=1}^8 \Phi_i \cdot \tau_i \right) \cdot 3600}{\eta_n \cdot \eta_{ак} \cdot \delta \cdot c (t_2 - t_1)} = \frac{1,1 \cdot 1273 \cdot 3600}{0,96 \cdot 0,94 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot (95 - 10)} = 15,6 \text{ м}^3.$$

Выбор конкретного водонагревателя осуществляют не только по мощности, но и по производительности:

$$\Pi = \frac{V_{ак}}{\tau_{зар}} = \frac{15,6}{6} = \frac{15600}{21600} = 0,72 \text{ л/с.}$$

Необходимая производительность составляет 0,72 л/с, а водонагреватель по паспортным данным может обеспечить 2,4 л/с, что удовлетворяет поставленным условиям.

Находим коэффициенты регулирования мощности:

$$P_{нм1} = \frac{P_{нmax}}{P_{ном}} = \frac{259,3}{250} = 1,04,$$

мощность нагревателя при этом  $P_n = 104\% \cdot P_{ном}$ :

$$P_{нм2} = \frac{P_{нmin}}{P_{ном}} = \frac{P_8}{P_{ном}} = \frac{22,9}{250} = 0,09,$$

где  $P_{нmin}$  – мощность соответствующая 8-му интервалу времени:

$$P_8 = \frac{k_3 \cdot \Phi_8}{\eta_n} = \frac{1,1 \cdot 100 \cdot 0,2}{0,96} = 22,9 \text{ кВт},$$

мощность нагревателя при этом  $P_n = 9\% \cdot P_{ном}$ .

Таким образом, мощность нагревателя может изменяться от 9% до 104%  $\cdot P_{ном}$ , что должно обеспечиваться соответствующим регулятором.

**Задача 9.2.** В процессе работы проточного элементного водонагревателя ЭВ-Ф-15 прекратилась подача воды. Определить сколько пройдет времени, когда вода внутри нагревателя закипит. По паспортным данным мощность водонагревателя  $P_{ном} = 15$  кВт; вместимость  $V = 15$  л; КПД нагревателя  $\eta_n = 0,96$ ; температура воды на выходе нагревателя  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ ; коэффициент запаса  $k_3 = 1,1$ ;

температура закипания воды  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость воды  $c = 4190$  (Дж/кг $\cdot$ °C); плотность воды  $\delta = 1$  кг/л.

### Решение

Определим промежуток времени, по истечении которого вода внутри водонагревателя закипит:

$$\tau = \frac{k_3 \cdot (V \cdot \rho) \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\eta_n \cdot P_{\text{ном}}} = \frac{1,1 \cdot (15 \cdot 1) \cdot 4190 \cdot (100 - 80)}{0,96 \cdot 15000} = 96 \text{ с} = 1,6 \text{ мин.}$$

**Задача 9.3.** Определить сколько времени потребуется для того, чтобы в непроточном режиме нагреть воду в электроводонагревателе САОС-400 от 10 до 90°C. По паспортным данным мощность водонагревателя  $P_{\text{ном}} = 12$  кВт; вместимость  $V = 400$  л; КПД нагревателя  $\eta_n = 0,97$ ; коэффициент запаса  $k_3 = 1,1$ ; температура закипания воды  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость воды  $c = 4190$  (Дж/кг $\cdot$ °C); плотность воды  $\delta = 1$  кг/л.

### Решение

Определим время нагрева воды в водонагревателе от 10 до 90°C:

$$\tau = \frac{k_3 \cdot (V \cdot \rho) \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\eta_n \cdot P_{\text{ном}}} = \frac{1,1 \cdot (400 \cdot 1) \cdot 4190 \cdot (90 - 10)}{0,97 \cdot 12000} = 12671 \text{ с} = 3,5 \text{ ч.}$$

**Задача 9.4.** Необходимо выбрать электрический паровой котел для тепловых нужд коровника на 200 дойных коров, имеющего молочный и кормоприготовительный цехи.

При выборе электрического парового котла для указанного коровника считаем, что одновременно происходят следующие тепловые процессы: запаривание смешанных кормов в кормозапарниках общей производительностью 500 кг/ч; подогрев технологической воды – 200 л/ч; пропаривание молочных фляг – 20 шт./ч; отопление молочного и кормоприготовительного цехов объемом 300 м<sup>3</sup>. Теплосодержание пара (при давлении 200 кПа)  $g_n = 2690$  кДж/кг; теплосодержание конденсата (при температуре +90°C)  $\lambda_k = 380$  кДж/кг.

### Решение

Учтя нормы расхода пара, определяем потребную часовую паропроизводительность в различных технологических процессах.

Таблица 9.2

### Нормы расхода пара

Процессы	Удельный расход пара, кг/кг
Запаривание 1 кг:	
корнеклубнеплодов	0,16-0,20
измельченной соломы	0,40-0,50
смешанных кормов	0,30-0,40
Варка зерновых, на 1 кг	0,12-0,15
Пастеризация молока, на 1 кг	0,12-0,15
Отопление 1 м <sup>3</sup> помещения кормоцеха и молочной в сутки	0,50-0,75
Пропаривание одной молочной фляги	0,20-0,25
Нагрев 1 л воды от 10 до 90 °С	0,18-0,20

Суммарная потребность в паре:

$$G = 0,4 \cdot 500 + 0,2 \cdot 200 + 0,25 \cdot 20 + \frac{0,75 \cdot 300}{24} = 254,4 \text{ кг/ч.}$$

Мощность парового электродогревателя определяем по формуле

$$P_n = \frac{G \cdot (g_n - \lambda_k)}{3600} = \frac{254,4 \cdot (2690 - 380)}{3600} = 163 \text{ кВт.}$$

Для удовлетворения нужд коровника выбираем электродный парогенератор ЭЭП-250И1 (табл. П. 26) мощностью 250 кВт, паропроизводительностью до 315 кг/ч. При небольшой экономии может быть принят парогенератор ЭЭП-160И1 мощностью 160 кВт, паропроизводительностью 200 кг/ч.

**Задача 9.5.** Рассчитать электрокалориферную установку. В электрокалорифере имеется две секции трубчатых нагревателей. В каждой секции шесть одинаковых ТЭНов, соединенных в схему «звезда» с искусственным нулем. Причем каждый луч «звезды» состоит из двух последовательно включенных ТЭНов. Напряжение питания 380/220 В. Диаметр провода каждого ТЭНа  $d_{np} = 0,5$  мм; длина провода  $l_{np} = 5,66$  м; материал провода – нихром с  $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; теплоемкость воздуха  $c = 1000$  (Дж/кг·°С), его плотность  $\delta = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

Определить подачу воздуха через электрокалорифер, если температура воздуха на входе в калорифер  $t_{вх} = -15^\circ\text{C}$ , а на выходе  $-t_{вых} = 50^\circ\text{C}$ .

### Решение

Электрическое сопротивление спирали ТЭНа:

$$R = \rho_{20} \cdot \frac{4 \cdot l_{np}}{\pi \cdot d_{np}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 5,66}{3,14 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2} = 31,72 \text{ Ом.}$$

Сопротивление на фазу каждой секции:

$$R_{\phi} = 2 \cdot R = 2 \cdot 31,72 = 63,44 \text{ Ом.}$$

Мощность на фазу каждой секции:

$$P_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{R_{\phi}} = \frac{220^2}{63,44} = 763 \text{ Вт.}$$

Суммарная мощность секции:

$$P_c = 3 \cdot P_{\phi} = 3 \cdot 763 = 2289 \text{ Вт.}$$

Общая мощность электрокалориферной установки:

$$P_{эку} = 2 \cdot P_c = 2 \cdot 2289 = 4578 \text{ Вт.}$$

Полезный тепловой поток электрокалорифера:

$$\Phi_{пол} = P_{эку} \cdot \eta_{эку} = 4578 \cdot 0,95 = 4349 \text{ Вт.}$$

Объемную подачу воздуха найдем по формуле

$$L = \frac{\Phi_{пол}}{\delta \cdot c \cdot (t_{вых} - t_{вх})} = L = \frac{4349}{1,2 \cdot 1000 \cdot (50 + 15)} = 0,0558 \text{ м}^3/\text{с} = 200,8 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

### Контрольные задания

1. Выбрать электрический водонагреватель и теплоаккумулирующую емкость мини-котельной сельскохозяйственного объекта, теплотребление которого задано следующими данными ( $\Phi_{max}$  – максимальный тепловой поток,  $\Phi_{max}=80$  кВт), представленными в таблице 9.3.

Таблица 9.3

#### Относительное теплотребление в зависимости от интервала времени

Показатели	i интервал времени							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Относительное теплотребление $K_i = \Phi_i/\Phi_{max}$	0,2	0,45	0,8	0,9	0,5	0,4	0,8	0,15
Интервал времени $\tau$ , ч	3,2	3,8	2,2	3,0	3,2	4,2	3,0	1,4

Коэффициент запаса  $k_z=1,1$ ; КПД нагревателя  $\eta_n=0,96$ ; КПД аккумулятора  $\eta_{ак}=0,93$ ; время разрешенной работы водонагревателя  $\tau_{зар}=6$  ч;

начальная температура воды  $t_1 = 12^\circ\text{C}$ , конечная –  $t_2 = 90^\circ\text{C}$ . Плотность воды  $\delta = 1000 \text{ кг/м}^3$ ; удельная теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ (кДж/кг}\cdot^\circ\text{C)}$ .

Определить мощность и тип электрического водонагревателя, вместимость теплоаккумулирующего бака, пределы необходимого регулирования мощности нагревателя.

2. В процессе работы проточного элементного водонагревателя ЭВП-2А прекратилась подача воды. Определить сколько пройдет времени, когда вода внутри нагревателя закипит. По паспортным данным мощность водонагревателя  $P_{ном} = 10,5 \text{ кВт}$ ; вместимость  $V = 12 \text{ л}$ ; КПД нагревателя  $\eta_n = 0,96$ ; температура воды на выходе нагревателя  $t_1 = 95^\circ\text{C}$ ; коэффициент запаса  $k_3 = 1,1$ ; температура закипания воды  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ (кДж/кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ; плотность воды  $\delta = 1 \text{ кг/л}$ .

3. Определить сколько времени потребуется для того, чтобы в непроточном режиме нагреть воду в электроводонагревателе УАП-800 от  $10$  до  $95^\circ\text{C}$ . По паспортным данным мощность водонагревателя  $P_{ном} = 18 \text{ кВт}$ ; вместимость  $V = 800 \text{ л}$ ; КПД нагревателя  $\eta_n = 0,97$ ; коэффициент запаса  $k_3 = 1,1$ ; температура закипания воды  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ (кДж/кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ; плотность воды  $\delta = 1 \text{ кг/л}$ .

4. Необходимо выбрать электрический паровой котел для тепловых нужд коровника на 250 дойных коров, имеющего молочный и кормоприготовительный цехи.

При выборе электрического парового котла для указанного коровника считаем, что одновременно происходят следующие тепловые процессы: запаривание смешанных кормов в кормозапарниках общей производительностью  $600 \text{ кг/ч}$ ; подогрев технологической воды –  $250 \text{ л/ч}$ ; пропаривание молочных фляг –  $25 \text{ шт./ч}$ ; отопление молочного и кормоприготовительного цехов объемом  $400 \text{ м}^3$ . Теплосодержание пара (при давлении  $200 \text{ кПа}$ )  $g_n = 2690 \text{ кДж/кг}$ ; теплосодержание конденсата (при температуре  $+90^\circ\text{C}$ )  $\lambda_k = 380 \text{ кДж/кг}$ .

5. Рассчитать электрокалориферную установку. В электрокалорифере имеется две секции трубчатых нагревателей. В каждой секции шесть одинаковых ТЭНов, соединенных в схему «звезда» с искусственным нулем. Причем каждый луч «звезды» состоит из двух последовательно включенных ТЭНов. Напряжение питания  $380/220 \text{ В}$ . Диаметр провода каждого ТЭНа  $d_{np} = 0,6 \text{ мм}$ ; длина провода  $l_{np} = 5,3 \text{ м}$ ; материал провода – нихром с  $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; теплоемкость воздуха  $c = 1000 \text{ (Дж/кг}\cdot^\circ\text{C)}$ , его плотность  $\delta = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Определить подачу воздуха через электрокалорифер, если температура воздуха на входе в калорифер  $t_{вх} = -17^\circ\text{C}$ , а на выходе –  $t_{вых} = 55^\circ\text{C}$ .



### Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяют электротермические установки?
2. Поясните, какие характерные особенности присущи сельскохозяйственным предприятиям, как объектам теплоснабжения.
3. Охарактеризуйте технические параметры водонагревателей типа ЭПЗ-25-И6М; ЭПЗ-60-И6М; ЭПЗ-100-И6М; ЭПЗ-250-ИЗМ и ЭПЗ-400-ИЗМ.
4. Как определить объем бака-аккумулятора для электротепловой?
5. Охарактеризуйте технические параметры проточных элементных водонагревателей типа: ЭВ-Ф-15, ЭВП-2А и ВЭП-600.
6. Охарактеризуйте технические параметры электродных парогенераторов КЭПР-160/0,4; КЭПР-250/0,4; ЭЭП-160И1; ЭЭП-250И1 и ЭЭП-400И1.
7. Приведите методику выбора электрокалориферной установки
8. Охарактеризуйте технические характеристики электрокалориферных установок ЭКОЦ (СФОЦ).

## Термины и определения электротермии

В электротермии, как и в любой другой прикладной науке, имеется определённая, узаконенная соответствующими стандартами (ГОСТ 22622-77, ГОСТ 16382-87, СТ МЭК 50 (841)-83), система терминов и определений.

**Диэлектрический нагрев** – электронагрев неэлектропроводящей загрузки токами смещения при поляризации.

**Дуговой нагрев** – электронагрев загрузки электрической дугой.

**Индуктор электронагревателя (печи)** – конструктивный узел, включающий индуктирующий провод.

**Индукционный нагрев** – электронагрев электропроводящей загрузки электрическими токами, которые индуцируются переменным магнитным полем.

**Инфракрасный нагрев** – электронагрев инфракрасным излучением при условии, что излучательные спектральные характеристики излучателя соответствуют поглощательным характеристикам нагреваемой загрузки.

**Ионный нагрев** – электронагрев загрузки потоком ионов, образованным электрическим разрядом в вакууме.

**Камера для нагрева** – конструктивный элемент электропечи (электротермической установки), ограничивающий пространство, в котором осуществляется электротермический процесс.

**Косвенный электронагрев** – процесс, при котором тепло выделяется в нагревателе и передаётся загрузке теплообменом.

**Лазерный нагрев** – электронагрев за счёт последовательного преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения и затем в тепловую в облучаемой загрузке.

**Нагрев сопротивлением** – электронагрев за счёт электрического сопротивления электронагревателя или загрузки.

**Нагрев токами сверхвысокой частоты** – электронагрев, при котором тепло в основном генерируется молекулярным движением и ионной проводимостью в неэлектропроводном материале под действием электромагнитных волн в диапазоне частот между 300 МГц и 300 ГГц (длины волн от 1 м до 1 мм).

**Нагревательный кабель (провод)** – кабель (провод) с жилами высокого электрического сопротивления, предназначенный для обогрева различных объектов.

**Нагревательный элемент** – деталь, съёмная или несъёмная, содержащая нагревательный проводник и приспособления, которые образуют самостоятельное устройство.

**Плазменный нагрев** – электронагрев загрузки стабилизированным высокотемпературным ионизированным газом, образующим плазму.

**Прямой электронагрев** – процесс, при котором тепло выделяется в загрузке, включенной в электрическую цепь.

**Электрический нагрев (электронагрев)** – раздел науки и техники, изучающий преобразование электроэнергии в термическую энергию для полезных целей.

**Электрод** – электрический проводник, имеющий электронную проводимость и находящийся в контакте с ионным проводником – электролитом (ионной жидкостью, твердым электролитом), ионизированным газом.

**Электрокалорифер** – электротермическое устройство, в котором воздух или газ нагреваются при движении через рабочее пространство, внутри которого расположен электронагреватель.

**Электронно-лучевой нагрев** – электронагрев загрузки сфокусированным электронным лучом в вакууме.

**Электротермическая установка (ЭТУ)** – совокупность электротермического и другого технологического оборудования вместе с сооружениями и коммуникациями, обеспечивающими проведение электротермического процесса.

**Электротермический эффект** – выделение или поглощение тепловой энергии, обусловленное продольным градиентом температуры при протекании электрического тока через однородный проводник.

**Электротермическое оборудование (ЭТО)** – комплекс технологического оборудования и устройств для осуществления электротермического процесса.

# Приложения

Таблица П. 1

## Физические характеристики некоторых материалов, сред и сельскохозяйственной продукции

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С
1	2	3	4
Воздух	1,29	1,07	0,034
Вода при давлении 1 кг/см <sup>2</sup> :			
t = 0 °С	1000	4,18	0,599
t = 100°С	958		
Лед при t = 0°С	920	2,23	2,30
Снег	200-410	2	0,1...0,47
Ацетон	791	2,18	0,174
Спирт	791	2,43	–
Молоко при t=20 °С	1030	3,91	0,59
Трансформаторное масло при t = 20°С	880	1,80	0,11
Капуста белокочанная при t = 20°С	702	3,97	0,34
Картофель при t = 20°С	1034	3,62	0,59
Свекла при t = 20°С	1050	3,83	0,78
Морковь при t = 20°С	1035	3,87	0,55
Лук репчатый при t = 20°С	944	3,82	0,35
Кабачки при t = 20°С	950	3,40	0,50
Томаты при t = 20°С	1020	4,02	0,57
Огурцы при t = 20°С	924	4,036	0,44
Яблоки при t = 20°С	830	3,58	0,40
Груши при t = 20°С	1010	3,81	0,51
Персики при t = 20°С	930	3,86	0,58
Стекло оконное (ГОСТ 111)	2500	0,84	0,76
Сосна и ель поперек волокон (ГОСТ 8486, ГОСТ 9463)	500	2,30	0,09
Сосна и ель поперек волокон	500	2,30	0,18
Дуб поперек волокон (ГОСТ 9462, ГОСТ 2695)	700	2,30	0,1
Дуб вдоль волокон	700	2,30	0,23
Фанера клееная (ГОСТ 8673)	600	2,30	0,12
Стекловата	200	0,67	0,037
Вермикулит	150	0,63	0,1
Рубероид (ГОСТ 10923), пергамин (ГОСТ 2697), толь	600	1,68	0,17

## Окончание табл. П. 1

1	2	3	4
Листы асбестоцементные плоские (ГОСТ 18124)	1600-1800	0,84	0,23-0,35
Пенополистерол стандартный	40-150	1,35	0,038-0,05
Газо- и пенобетон (ГОСТ 25485, ГОСТ 5742)	400-1000	0,84	0,11-0,29
Железобетон (ГОСТ 26633)	2500	0,84	1,69
Гранит, базальт	2800	0,88	3,49
Мрамор	2800	0,88	2,91
Известняк	1400-2000	0,88	0,49-0,93
Шамот	2600	0,88	0,7
Гравий керамзитовый (ГОСТ 9757)	200-800	0,84	0,099-0,18
Песок для строительных работ (ГОСТ 8736)	1600	0,84	0,35
Кирпич керамический лицевой (ГОСТ 7484)	1100-1200	–	0,31-0,37
Кирпич полнотелый красный (ГОСТ 7484)	2000	–	0,61
Кирпич керамический строительный с различной степенью пустотности от 22 до 43% (ГОСТ 530)	1100-1150	–	0,31-0,78
Кирпич строительный поризованный	960	–	0,21-0,26
Кирпич пустотелый поризованный (ГОСТ 530)	790-950	–	0,18-0,26
Сталь стержневая, арматурная (ГОСТ 10884, ГОСТ 5781)	7850	0,482	58
Чугун (ГОСТ 9583)	7200	0,482	50
Алюминий (ГОСТ 22233, ГОСТ 24767)	2600	0,84	221
Медь (ГОСТ 931, ГОСТ 15527)	8500	0,42	407

Удельная теплота парообразования:

- вода  $a_n=2260$  кДж/кг;
- ацетон  $a_n=524$  кДж/кг;
- спирт  $a_n=1190$  кДж/кг.

Удельная теплота плавления:

- лед  $a_{пл}=334$  кДж/кг;
- сталь  $a_{пл}=205$  кДж/кг.

Предельно допустимая температура нагрева:

- бетон  $T=673$  К;
- стекловата  $T=723$  К;
- вермикулит  $T=423$  К;
- асбест  $T=523$  К;
- шамот  $T=1623$  К.

Таблица П. 2

**Температурные режимы тепловых процессов  
в сельскохозяйственном производстве**

Тепловой процесс	Рабочая температура процесса, °С
Подогрев воды:	
для отопления	70-95
для мойки молочного оборудования	55-65
для подмывания вымени коров	37-38
для приготовления кормов	40-65
для поения животных	12-20
для полива растений	20-25
Отопление:	
животноводческих помещений	8-20
птицеводческих помещений	16-35
теплиц и парников	20-30
Подогрев воздуха:	
для активного вентилирования сельскохозяйственной продукции	10-35
для сушки сельскохозяйственной продукции	30-300
для сушки зерна:	
семенного	60-70
продовольственного	120-140
Обогрев:	
полов помещений, где содержится скот и птица	14-36
почвы парников и теплиц при выращивании:	
– лука на перо	18
– ранней зелени	15
– рассады капусты	12
– рассады помидоров	20
– рассады огурцов	25
Пастеризация молока:	
длительная	65
кратковременная	71
высокотемпературная	85-96
Запаривание картофеля	98

Таблица П. 3

**Степень черноты  $\epsilon$  полного излучения различных материалов  
в зависимости от состояния поверхности и температуры**

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon$
<b>Изоляционные, огнеупорные и строительные материалы</b>		
Асбестовый картон	24	0,96
Вода	20	0,95-0,98
Дерево строганое	20	0,80-0,90
Кирпич красный	20	0,93
Кирпич шамотный глазурованный	1100	0,75
Краски масляные различных цветов	100	0,92-0,96
Краски масляные алюминиевые	100	0,27-0,67
Стекло гладкое	22	0,94
<b>Металлы</b>		
Алюминий полированный	225-575	0,039-0,057
Алюминий с шероховатой поверхностью	20-50	0,06-0,07
Алюминий сильно окисленный	50-500	0,20-0,30
Латунь полированная	245-375	0,028-0,037
Латунь листовая прокатанная	20	0,06
Латунь окисленная при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,610-0,590
Медь окисленная при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,57-0,87
Нихромовая проволока окисленная	50-500	0,95-0,98
Олово	25	0,043-0,064
Сталь листовая шлифованная	940-1100	0,520-0,610
Сталь окисленная	200-600	0,790
Сталь окисленная шероховатая	40-370	0,940-0,970
Чугун полированный	200	0,210
Чугун окисленный при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,640-0,780
Чугун шероховатый сильно окисленный	40-250	0,640-0,780

Таблица П. 4

**Глубина проникновения тока для немагнитных металлов, мм**

Металл	Температура, $^\circ\text{C}$	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Частота, кГц										
			0,06	0,5	1,0	2,5	4,0	8,0	10	30	70	200	500
Алюминий	20	0,027	10,7	3,70	2,61	1,65	1,30	0,92	0,83	0,48	0,31	0,18	0,12
	250	0,053	15,0	5,18	3,66	2,32	1,83	1,29	1,16	0,67	0,44	0,26	0,16
	500	0,087	19,2	6,64	4,69	2,97	2,35	1,66	1,48	0,86	0,56	0,33	0,21
Медь	20	0,018	8,81	3,05	2,16	1,36	1,08	0,76	0,68	0,39	0,26	0,15	0,10
	500	0,050	14,5	5,03	3,56	2,25	1,78	1,26	1,12	0,65	0,43	0,25	0,16
	900	0,085	19,3	6,67	4,72	2,98	2,36	1,67	1,49	0,86	0,56	0,33	0,21

Металл	Температура, °С	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Частота, кГц										
			0,06	0,5	1,0	2,5	4,0	8,0	10	30	70	200	500
Латунь	20	0,065	16,6	5,74	4,06	2,56	2,03	1,43	1,28	0,74	0,48	0,29	0,18
	400	0,114	21,9	7,60	5,37	3,40	2,69	1,90	1,70	0,98	0,64	0,38	0,24
	900	0,203	29,3	10,1	7,17	4,53	3,58	2,53	2,27	1,31	0,86	0,51	0,32
Нежелезистая сталь	20	0,690	53,9	18,7	13,2	8,36	6,61	4,67	4,18	2,41	1,58	0,93	0,59
	800	1,150	69,6	24,1	17,1	10,8	8,53	6,03	5,39	3,11	2,04	1,21	0,76
	1200	1,240	72,3	25,1	17,7	11,2	8,86	6,26	5,60	3,23	2,12	1,25	0,79
Серебро	20	0,017	8,34	2,89	2,04	1,29	1,02	0,72	0,65	0,37	0,24	0,14	0,09
	300	0,038	12,7	4,39	3,10	1,96	1,55	1,10	0,98	0,57	0,37	0,22	0,14
	800	0,070	17,2	5,95	4,21	2,66	2,10	1,49	1,33	0,77	0,50	0,30	0,19
Титан	20	0,500	45,9	15,9	11,3	7,11	5,62	3,98	3,56	2,05	1,34	0,80	0,50
	600	1,400	76,8	26,6	18,8	11,9	9,41	6,65	5,95	3,44	2,25	1,33	0,84
	1200	1,800	87,1	30,2	21,3	13,5	10,7	7,54	6,75	3,90	2,55	1,51	0,95

Таблица П. 5

**Материалы для нагревательных элементов сопротивления**

Материалы	Плотность, $\delta \times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельное электрическое сопротивление при 20°C, $\rho_{20} \times 10^{-6}$ , Ом·см	Температурный коэффициент сопротивления, $\alpha \times 10^{-6}$ , 1/°C	Температура плавления $t_{пл}$ , °C	Максимальная рабочая температура (при диаметре проволоки 1 мм) $t_{раб}$ , °C
<b>Сплавы</b>					
X20N80-N	8,4	1,06-1,17	16-35	1400	1100
X15N60-N	8,2	1,12-1,17	16	1390	1000
X15N60Ю3А	8,2	1,25	16	1600	1200
X13Ю4	7,3	1,18-1,34	20	1550	1200
X23Ю5Т	7,27	1,35	17	1700	1100
X27Ю5Т	7,19	1,39	15	1600	1200
XН70Ю	7,9	1,3	16	1500	1100
Сталь	7,8	0,14-0,16	2250	1400	500
Спецстали	7,6-7,9	0,4-0,5	Переменный	1600	700
<b>Неметаллические материалы</b>					
Карборунд	2,3	800-1900	Переменный	–	2630
Графит	1,6	8-15	Переменный	–	2300
Уголь	1,6	40-60	Переменный	–	2300-2800

Примечание: буквы в марках сплавов означают: Х – хром; Н – никель; Ю – алюминий; Т – титан. Цифра после букв обозначает процентное содержание элемента; А – высококачественный сплав, Н – для нагревательных элементов.



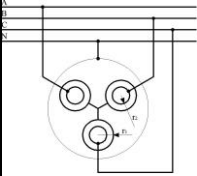
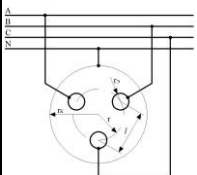
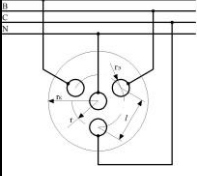
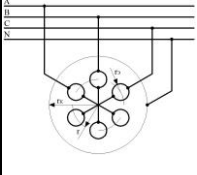
Таблица П. 6

**Нагрузка в амперах, соответствующая определенным  
температурам нагрева нихромовой проволоки, подвешенной  
горизонтально в спокойном воздухе при температуре 20°C**

Диаметр проволоки, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимые нагрузки (А) при расчётной температуре t <sub>расч</sub> , °С					
		400	600	700	800	900	1000
5,0	19,6	83	105	124	146	173	206
4,0	12,6	60	80	93	110	129	151
3,0	7,07	37,5	54,5	64	77	88	102
2,5	4,91	27,5	40	46,6	57,5	66,5	73,0
2,0	3,14	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
1,8	2,54	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
1,6	2,01	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,5	1,77	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,4	1,54	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,3	1,33	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,2	1,13	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,1	0,95	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,0	0,785	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,9	0,636	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5	16,5
0,8	0,503	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3	14,0
0,75	0,442	5,3	7,55	8,4	9,95	11,25	12,85
0,70	0,385	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	0,332	4,4	6,3	7,15	8,25	9,3	10,75
0,60	0,282	4,0	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	0,238	3,55	5,1	5,8	6,75	7,6	8,7
0,50	0,195	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
0,45	0,159	2,75	3,9	4,45	5,2	5,85	6,75
0,40	0,126	2,34	3,3	3,85	4,4	5,0	5,7
0,35	0,096	1,95	2,76	3,3	3,75	4,15	4,75
0,30	0,085	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4	3,85
0,25	0,049	1,33	1,83	2,15	2,4	2,7	3,1
0,20	0,0314	1,03	1,4	1,65	1,82	2,0	2,3
0,15	0,0177	0,74	0,99	1,15	1,28	1,4	1,62
0,10	0,00785	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9	1,0

Таблица П. 7

### Конструктивные схемы и расчетные формулы электродных систем водонагревателей и паровых котлов

Конструктивная схема электродной системы	Эквивалентная электрическая схема: основная (дополнительная)	Геометрический коэффициент (для основной схемы)	Максимальная напряженность поля (для основной схемы)	Примечание
1	2	3	4	5
	«Звезда»	$k_{эз} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_H}{r_6}$	$E_{\max} = \frac{U_{\phi}}{r_6 \cdot \ln \frac{r_H}{r_6}}$	Оптимальное соотношение: $r_6/r_H=0,368$
	«Треугольник» («звезда»)	$k_{эз} = \frac{1}{4\pi} \cdot \ln \left[ \frac{3r^2(r_k^2 - r^2)^3}{r_s^2(r_k^6 - r^6)} \right]$	$E_{\max} = \frac{0,43 \cdot U_{\phi}}{\sqrt{3}r_s \cdot \lg \frac{2 \cdot r_s + l}{r_s \cdot \sqrt{3}}}$	Оптимальное соотношение размеров: $r=0,51r_k$ $r_s=0,21r_k$
	«Звезда» («треугольник»)	$k_{эз} = (0,33...0,5) \cdot \frac{1}{4\pi} \times \ln \left[ \frac{3r^2(r_k^2 - r^2)^3}{r_s^2(r_k^6 - r^6)} \right]$	$E_{\max} = k \frac{U_{\phi}}{l},$ $k > l$	—
	«Треугольник» («звезда»)	$k_{эз} = \frac{1}{8\pi} \cdot \ln \left[ \frac{3r^2(r_k^4 - r^4)^2}{4r_s^2(r_k^3 - r^3)^3} \right]$	—	—

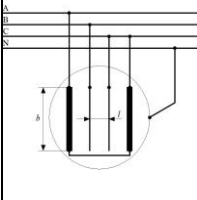
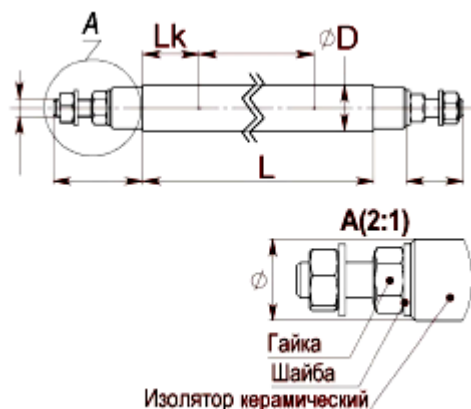
1	2	3	4	5
	«Треугольник» («звезда»)	$k_{эз} = \frac{l}{(n-1) \cdot b}$	$E_{\text{макс}} = k \frac{U_{\text{л}}}{l},$ $k > l$	$n$ – число пластин
Однофазная система состоящая из двух плоских параллельных электродов	–	$k_{эз} = \frac{l}{b}$		$b$ – ширина плоского электрода; $l$ – расстояние между электродами

Таблица П. 8

## Трубчатые электронагреватели серии ТЭН

Обозначение	Мощность, кВт	Развернутая длина, см	Диаметр, мм
ТЭН 60 В 13/1,0 К 220	1,00	60	13
ТЭН 60 В 13/1,0 О 220	1,00	60	13
ТЭН 60 А 13/0,5 К 220	0,50	60	13
ТЭН 73 В 13/2,5 К 220	2,50	73	13
ТЭН 73 В 13/2,0 К 220	2,00	73	13
ТЭН 80 В 13/1,25 К 220	1,25	80	13
ТЭН 80 В 13/1,25 О 220	1,25	80	13
ТЭН 80 В 13/2,0 К 220	2,00	80	13
ТЭН 100 А 16/1,6 К 220	1,60	100	16
ТЭН 80 В 13/1,25 О 220	1,25	80	13
ТЭН 100 В 13/1,0 К 220	1,00	100	13
ТЭН 120 А 13/2,5 К 220	2,50	120	13
ТЭН 120 С 13/1,6 К 380	1,60	120	13
ТЭН 137 D 8,0/1,5К 220	1,50	137	8
ТЭН 140 В 16/3,5 К 220	2,00	140	16
ТЭН 145 С 13/2,0 К 220	2,00	145	13
ТЭН 150 Е 13/2,0 К 220	2,00	150	13
ТЭН 170 Д 13/2,0 К 220	2,00	170	13
ТЭН 173 А 13/3,0 К 220	3,00	173	13
ТЭН 200 Д 13/2,5 К 220	2,50	200	13
ТЭН 200 Е 16/2,5 К 220	2,50	200	16
ТЭН 200 С 13/3,15 К 220	3,15	200	13

Примечание. Расшифровка маркировки ТЭН 120 В 13/1,0 Т 220: 120 – развернутая длина  $L_{\text{в}}$  в сантиметрах; В – обозначение длины контактного стержня в заделке  $L_{\text{к}}$ ; 13 – диаметр оболочки  $D$ , в миллиметрах; 1,0 – номинальная мощность в киловаттах (потребляемая мощность электронагревателя не должна превышать его номинального значения более, чем на 10%); Т – обозначение нагреваемой среды и материала оболочки; 220 – номинальное напряжение в вольтах.



**Рис. П. 1. Стандартная заделка  $L_k$  контактного стержня ТЭН:**

A – 40; B – 65; C – 100; D – 125; E – 160; F – 250; G – 400; H – 630 мм

Таблица П. 9

**Обозначение нагреваемой среды и материала оболочки**

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup> , не более	Материал оболочки ТЭН
1	2	3	4	5
X	Вода, слабый раствор щелочей и кислот (рН 5-9)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100°С	9,0	Меди и латунь (с покрытиями)
J	Вода, слабый раствор кислот (рН 5-7)	То же	15,0	Нержавеющая жаростойкая сталь
P	Вода, слабый раствор щелочей (рН 7-9)	То же	15,0	Углеродистая сталь
Q	Вода, слабый раствор кислот (рН 5-7)	То же	9,5	Алюминиевые сплавы
S		Нагрев в спокойной газовой среде до рабочей температуры на оболочке ТЭН 450°С	2,2	Углеродистая сталь
T			5,0	Нержавеющая жаропрочная сталь

## Окончание табл. П. 9

1	2	3	4	5
О	Воздух и пр. газы и смеси газов	Нагрев в среде с движущимся со скоростью 6 м/с воздухом с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450°C	5,5	Углеродистая сталь
К		Нагрев в среде с движущимся со скоростью не менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН свыше 450°C	6,5	Нержавеющая жаростойкая сталь
Р		Нагрев в среде с движущимся со скоростью менее 6 м/с воздухом с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450°C	3,1	Углеродистая сталь
Н		Нагрев движущимся со скоростью менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН свыше 450°C	5,1	Нержавеющая жаростойкая сталь
Z	Жиры, масла	Нагрев в ваннах и др. емкостях	3,0	Углеродистая сталь
V	Щелочь, щелочно-селитровая смесь	Нагрев и плавление в ваннах и др. емкостях с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 600°C	3,5	Углеродистая сталь
W	Легкоплавкие металлы: олово, свинец и др.	То же, с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450°C	3,5	Углеродистая сталь

Таблица П. 10

**Допустимые значения удельной поверхностной мощности  
для трубчатых электронагревателей**

Нагреваемая среда	Характер и условия нагрева	Рекомендуемый материал оболочки ТЭН	Удельная нагрузка, Вт/см <sup>2</sup>	
			рекомендуемая	максимально допустимая
1	2	3	4	5
Вода	Нагрев в проточном водоподогревателе	алюминиевый сплав; луженные медь и латунь;	8-12	15

1	2	3	4	5
	Нагрев, кипячение в баке водоподогревателя	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т; стали 10 и 20 с противокоррозионным покрытием	6-10	11
Воздух	Нагрев в спокойной среде с температурой до 400°С на оболочке ТЭН	Стали 10-12	1,2-1,8	2,3
	Нагрев в спокойной среде с температурой свыше 400°С на оболочке ТЭН	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	2,3-5,0	6,0
	Нагрев движущегося со скоростью до 6 м/с воздуха и температура на оболочке ТЭН свыше 400°С	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	3,0-4,5	6,0
	Нагрев в калорифере движущегося со скоростью свыше 6 м/с воздуха и температура на оболочке ТЭН до 400°С	Стали 10-12	5,0-5,5	7,0
Пищевые жиры, масла	Нагрев в емкости	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	2,5-3,0	3,5
Молоко	Подогрев в емкости	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	1,5-2,0	2,5
Лучистый обогрев животных и птиц	С экранами при высоте подвеса не менее 1,5 м	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	5,0-6,0	7,0
Бытовые электроплитки	Нагреватели залиты в металл конфорки	Стали 10-20	5,0-7,0	8,0

Таблица П. 11

**Количество выделяемых одним животным: углекислоты,  
влаги, теплоты при  $t = 10^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  
воздуха 70% (по НТН-СХ.16-5, НТП-СХ. 2-28)**

Вид животных	Живая масса, кг	Углекислота, л/ч	Водяные пары, л/ч	Поток теплоты, Вт
1	2	3	4	5
Коровы сухостойные	200	90	288	207
	400	110	350	661
	600	138	440	778
	800	162	516	911
Коровы лактирующие:				
с удоем 10 л	300	96	307	542
	400	114	364	639
	500	128	410	722
	600	143	455	800
с удоем 15 л	300	105	392	661
	400	129	458	722
	500	142	507	797
	600	156	549	875
с удоем 30 л	400	175	560	983
	600	200	642	1125
	800	225	721	1264
Телята в возрасте:				
до 1 месяца	30	15	47	84
	50	26	86	146
	80	38	121	215
от 1 до 3 месяцев	60	32	102	181
	100	42	135	236
	130	57	182	319
от 3 до 4 месяцев	90	37	118	208
	150	57	183	319
	200	75	240	422
Свиноматки супоросные	100	40	110	219
	150	46	129	261
	200	52	147	311
Свиноматки подсосные с поросятами	100	87	242	494
	150	99	276	564
	200	114	320	653
Поросята 2-х месячного возраста	15	17	49	92
	50	27	77	157

Окончание табл. П. 11

1	2	3	4	5
Ремонтный и откормочный молодняк	60	33	92	186
	80	38	107	207
	90	41	114	232
Хряки - производители	100	44	123	250
	200	57	161	322
	300	77	216	435
Свины откормочные	100	47	132	269
	200	63	175	358
	300	83	230	472
Бараны	50	25	70	143
	80	33	33	186
	100	35	98	200
Матки холостые	40	19	52	105
	50	22	62	126
	60	28	78	154
Матки подсосные с приплодом:				
1 ягненок	40	22	62	126
	50	25	70	142
	60	28	78	154
2 ягненка	40	44	112	245
	50	47	133	267
	60	52	145	293
Молодняк после отбивки мелких пород	20	14	39	80,2
	40	21	58	116
Молодняк после отбивки крупных пород	30	17	46	93
	50	23	64	131

Примечание: нормы выделения животными приведены при температуре в помещении 10°C и относительной влажности воздуха 70% для крупного рогатого скота и 70...75% – для свиней. При других температурах воздуха внутри помещения нормы выделения теплоты и влаги определяют с учетом коэффициентов, указанных в таблице П. 12. При относительной влажности воздуха 80...85% количество выделенных животными теплоты, углекислоты и водяных паров увеличивается на 3%.



Таблица П. 12

**Коэффициенты для определения количества водяных паров  
и свободной теплоты при различных температурах внутри  
помещения**

Температура внутри помещения, °С	Коэффициенты для определения количества					
	свободной теплоты	водяных паров	свободной теплоты	водяных паров	свободной теплоты	водяных паров
	КРС		Свиноматки, свиньи откормочные		Овцы	
-10	1,31	0,61	–	–	–	–
-5	1,19	0,67	1,59	0,72	1,15	0,90
0	1,08	0,76	1,27	0,83	1,08	0,96
5	1,05	0,86	1,08	0,98	1,04	0,99
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,00
15	0,96	1,24	0,08	1,15	0,57	1,06
20	0,93	2,04	1,15	1,53	1,09	1,13
25	0,89	2,49	1,47	1,96	1,18	1,24

Таблица П. 13

**Количество теплоты, углекислоты и водяных паров,  
выделяемых на 1 кг живой массы для молодняка до 30 дней  
при 24°С, а для остальных – при 16°С**

Виды и возрастные группы птиц	Живая масса птицы, кг	Тепловой поток, Вт	Углекислота, л/ч	Водяные пары, г/ч
1	2	3	4	5
<b>Взрослые птицы</b>				
– при содержании в клетках: куры яичных пород	1,5-1,7	7,9	1,7	5,1
– при напольном содержании:				
куры яичных пород	1,5...1,7	9,2	2	5,8
куры мясных пород	2,5...3,0	8,4	1,8	5,2
индейки	6,8	7,8	1,7	5
утки	3,5	5,6	1,2	3,6
<b>Молодняк птицы</b>				
– куры яичного направления:				
от 1 до 10 дн.	0,06	15,7	2,3	3,5
от 11 до 30 дн.	0,25	10,25	2,2	6,6
от 31 до 60 дн.	0,6	8,6	1,9	5,7
от 61 до 150 дн.	1,3	7,9	1,7	5
от 151 до 210 дн.	1,6	7,4	1,6	4,8
– куры мясного направления:				
от 1 до 10 дн.	0,08	15	2,2	4

1	2	3	4	5
от 11 до 30 дн.	0,35	9,4	2	6,3
от 31 до 60 дн.	1,2-1,4	8,4	1,8	5,4
от 61 до 150 дн.	1,8	7,8	1,7	5
от 151 до 210 дн.	2,5	7,2	1,6	4,8
– индейки				
от 1 до 10 дн.	0,1	12,2	2	4,2
от 11 до 30 дн.	0,6	9,8	2,1	6,6
от 31 до 60 дн.	1,5	8,4	1,8	9,2
от 61 до 120 дн.	4	7,4	1,6	4,8
от 121 до 180 дн.	6	7,2	1,5	4,5
– утки:				
от 1 до 10 дн.	0,2	16,3	3,5	10,5
от 11 до 30 дн.	1	11,8	2,5	7,5
от 31 до 55 дн.	2,2	5,6	1,2	3,6
от 56 до 180 дн.	3	4,7	1	3

Примечание: нормы выделений птиц приведены при температуре воздуха в помещении 16...20°C и оптимальной относительной влажности воздуха для кур и индеек – 60...70%; для уток и гусей – 70...80%. При других температурах воздуха внутри помещения нормы выделения теплоты и влаги определяют с учетом коэффициентов, указанных в таблице П. 14. При относительной влажности воздуха 80...85% количество выделенных животными теплоты, углекислоты и водяных паров увеличивается на 3%.

Таблица П. 14

**Поправочные коэффициенты для определения тепловых потоков и влаговыделений птиц при различных температурах внутри помещения**

Температура, °С	Коэффициенты для определения количества		Коэффициенты для определения количества	
	свободной теплоты	водяных паров	свободной теплоты	водяных паров
	молодняк старше 30 дней и взрослые птицы		молодняк в возрасте от 1 до 30 дней	
4	1,15	0,85	-	-
8	1,10	0,90	-	-
12	1,05	0,95	-	-
16	1,00	1,00	-	-
20	0,95	1,05	1,05	0,95
24	0,92	1,08	1,00	1,00
28	0,90	1,10	0,95	1,05
32	0,85	1,25	0,92	1,20
36	0,80	1,30	0,80	1,30

Таблица П. 15

**Среднесуточный выход помета от одной птицы**

Вид птицы	$P_{\text{пом, Г}}$	Влажность, %
<b>Взрослые птицы</b>		
– куры направления:		
яичного	240	73
мясного	290	73
– индейки	430	73
– утки	550	83-85
<b>Молодняк:</b>		
– куры в возрасте:		
1-30 дней	30	73
31-60 дней	80	73
61-150 дней	120	73
151-210 дней	210	73
– индейки в возрасте:		
1-20 дней	100	73
21-120 дней	280	73
121-180 дней	420	73
– утки в возрасте		
1-10 дней	80	83-85
11-20 дней	226	83-85
21-30 дней	260	83-85
31-180 дней	500	83-85

Таблица П. 16

**Температура, плотность и влагосодержание воздуха при полном насыщении**

Температура, °С	Плотность сухого воздуха, кг/м <sup>3</sup>	Кол-во насыщающих водяных паров в 1 кг сухого воздуха $d$ , г/кг	Температура, °С	Плотность сухого воздуха, кг/м <sup>3</sup>	Кол-во насыщающих водяных паров в 1 кг сухого воздуха $d$ , г/кг
1	2	3	4	5	6
99	0,949	17000	4	1,275	5,10
30	1,165	26,2	3	1,279	4,77
29	1,169	25,6	2	1,284	4,48
28	1,173	24,0	1	1,288	4,15
27	1,177	22,6	0	1,293	3,90
26	1,181	21,4	-1	1,298	3,58
25	1,185	20,0	-2	1,303	3,30
24	1,189	18,8	-3	1,308	3,10

1	2	3	4	5	6
23	1,193	17,7	-4	1,312	2,80
22	1,197	16,8	-5	1,317	2,60
21	1,201	15,6	-6	1,322	2,40
20	1,205	14,7	-7	1,327	2,25
19	1,209	13,8	-8	1,332	2,08
18	1,213	12,9	-9	1,337	1,93
17	1,217	12,1	-10	1,342	1,80
16	1,222	11,4	-11	1,348	1,65
15	1,226	10,6	-12	1,353	1,50
14	1,23	9,97	-13	1,358	1,40
13	1,235	9,37	-14	1,363	1,30
12	1,239	8,75	-15	1,368	1,20
11	1,243	8,15	-16	1,374	1,11
10	1,248	7,63	-17	1,379	1,04
9	1,252	7,13	-18	1,385	0,93
8	1,256	6,65	-19	1,394	0,86
7	1,261	6,21	-20	1,396	0,80
6	1,265	5,79	-25	1,405	0,59
5	1,27	5,40	-30	1,412	0,48

Таблица П. 17

**Значения сопротивлений тепловосприятию  $R_g$   
для животноводческих и птицеводческих зданий  
(по СНиП 11-Н-3-69)**

Элементы ограждений	$R_g, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$
Внутренние стены помещений, в которых заполнение животными составляет более 80 кг живой массы на 1 м <sup>2</sup> пола	0,086-0,116
Внутренние стены помещений, в которых заполнение животными составляет 80 кг живой массы на 1 м <sup>2</sup> пола	0,115-0,155
Чердачные перекрытия или покрытия	0,115-0,155

Таблица П. 18

**Значения сопротивлений теплоотдаче  $R_n$  для наружных  
поверхностей ограждений (по СНиП 11-А, 7-62)**

Расположение наружных поверхностей	$R_n, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$
Наружные стены, бесчердачные покрытия	0,043
Поверхности, выходящие на чердак	0,086-0,123

Таблица П. 19

### Удельные тепловые характеристики производственных зданий

Вид здания	Объём здания или сооружения, тыс. м <sup>3</sup>	Удельная тепловая характеристика, Вт/м <sup>2</sup> ·°С	
		отопительная	вентиляционная
Ремонтные мастерские	5-10	0,7-0,6	0,23-0,17
Столярные мастерские	5	0,52	0,52
Гаражи	3	0,70	Не учитывается
	5	0,64	0,81
Бытовые и административно-вспомогательные помещения	0,5-1,0	0,7-0,52	Не учитывается
	1,0-2,0	0,52-0,47	
Помещения для содержания крупного рогатого скота:			
молодняка	10	0,291	1,396
взрослых животных	10	0,174	1,047
Помещения для содержания свиней			
молодняка	5	0,407	1,280
взрослых животных	5	0,174	1,105
Овчарни	10	0,105	0,640
Помещения для содержания птицы	10	0,756	1,396

Таблица П. 20

### Выделенные частоты для нагрева в электрическом поле высокой частоты

Частота	Пределы изменения частот
1	2
<i>Средневолновой диапазон</i>	
440 кГц	± 2,5%
880 кГц	± 1,0%
1760 кГц	± 2,5%
<i>Коротковолновый диапазон</i>	
5,28 МГц	± 2,5%
13,56 МГц	± 1,0%
27,12 МГц	± 1,0%
<i>Метровый диапазон</i>	
40,68 МГц	± 1,0%
81,36 МГц	± 1,0%
152,5 МГц	± 1,0%
300,0 МГц	± 1,0%
<i>Дециметровый диапазон</i>	
2375 МГц	± 2,0%

1	2
<i>Сантиметровый диапазон</i>	
22125 МГц	± 0,5%

Примечание: уровень поля радиопомех от установок высокочастотного нагрева не должен превышать 50 мкВ на расстоянии 50 м для частоты 81,36 МГц; 200 мкВ на расстоянии 120 м для всех остальных частот, приведенных в таблице П. 20.

Таблица П. 21

### Технические данные высокочастотных генераторов

Тип генератора	Назначение	Номинальная мощность (колебательная), кВт	Рабочая частота, МГц	Мощность, потребляемая из сети, кВт
ВЧГ3-4/1,76	Поверхностная закалка	4	1760	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. 22

### Технические данные высокочастотных генераторов для установок диэлектрического нагрева

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	85,0
ВЧГ1-160/13	160	13,56	10,5	300,0
ВЧГ4-4/27	4	27,12	6,0	7,0
ВЧГ2-10/27	10	27,12	7,5	20,0
ВЧГ2-25/27	25	27,12	7,5	38,0

Таблица П. 23

### Основные технические характеристики проточных элементных водонагревателей

Параметр	ЭВП-2А	ЭВ-Ф-15	ВЭП-600
Номинальная мощность, кВт	10,5	15	10,5
Номинальное напряжение, В	380/220	380/220	380/220
Максимальная температура воды, °С	95	80	10; 16; 22 (80)
Вместимость, л	12	15	100
Производительность л/ч	115	160	600 (100)

Таблица П. 24

### Технические характеристики электроводонагревателей типа ЭПЗ

Наименование параметра	Значение параметра для водонагревателей типов				
	ЭПЗ-25-И6М	ЭПЗ-60-И6М	ЭПЗ-100-И6М	ЭПЗ-250-ИЗМ	ЭПЗ-400-ИЗМ
Номинальная потребляемая мощность, кВт	25*	60*	100*	250*	400*
Номинальное напряжение, В	380				
Номинальный ток, А	38	91	152	380*	610*
Частота тока, Гц	50				
Номинальная температура воды при номинальной производительности, °С:					
на входе	70				
на выходе	90		95		
Максимальное рабочее давление в корпусе электроводонагревателя, МПа	0,6(6)				
Производительность при номинальной температуре, м <sup>3</sup> /ч	1,06**	25**	4,2**	8,75	14,0
Объем электроводонагревателя, м <sup>3</sup>	0,019	0,026	0,032	0,076	0,105
Площадь обогрева, м <sup>2</sup>	210***	520**	860***	3000**	4000**
Номинальное удельное электрическое сопротивление, применяемой воды при 20°С, Ом·м	20				
Габаритные размеры водонагревателя, мм	320×725	320×855	320×1055	472×1480	472×1850
Масса, кг	76	93	115	135	179

Примечание: \*расчетное значение зависит от удельного сопротивления применяемой воды, номинальное значение которого принято и рекомендовано для эксплуатации 20 Ом·м при температуре 20°С, а также разности температуры воды на входе и выходе электронагревателя, принятой 70 и 90°С соответственно;

\*\* значение указано при номинальных значениях мощности и температур на входе и выходе электронагревателей 70 и 90°С;

\*\*\* расчетное значение зависит от размеров и конструкции помещения.

Структура условного обозначения: ЭПЗ-Х-ИХМ УХЛ4: Э – метод нагрева – электродный; П – проточный; З – замкнутый контур; Х – мощность, кВт; ИХ – порядковый номер модификации; М – модернизированный; УХЛ4 – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Таблица П. 25

**Основные технические характеристики элементных емкостных электроводонагревателей**

Наименование параметра	Значение параметра для водонагревателей типов					
	УАП-400	УАП-800	УАП-1600	САОС-400 САЗС-400	САОС-800 САЗС-800	ЭВ-150
Номинальная мощность, кВт	12	18	30	12	18	6
Вместимость резервуара, л	400	800	1600	400	800	150
Максимальная температура воды, °С	95	95	95	90	90	90
Время нагрева воды до максимальной температуры, ч	3,3	4,5	6	3,5	5	3

Таблица П. 26

**Основные технические данные электродных парогенераторов**

Наименование параметра	Значение параметра для водонагревателей типов				
	КЭПР 160/0,4	КЭПР 250/0,4	ЭЭП-160И	ЭЭП-250И	ЭЭП-400И
Номинальная мощность, кВт	160	250	160	250	400
Паропроизводительность, кг/ч	210	320	200	315	500
Диапазон регулирования мощности, %	100-5	100-5	25, 50	75, 100	100-0
Удельное электрическое сопротивление, применяемой воды при 20°С, Ом·м	10-120	10-120	15-60	15-60	15-60
Максимальная температура пара, °С	164	164	164	164	164
Масса, кг	395	400	290	310	400



Таблица П. 27

### Основные технические характеристики электрокалориферных установок ЭКОЦ (СФОЦ)

Марка установки	Мощность, кВт	Производительность по воздуху, м <sup>3</sup> /ч	Перепад температуры на входе и выходе, °С	Полный аэродинамический напор, развиваемый вентилятором, Па	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
					длина	ширина	высота	
ЭКОЦ (СФОЦ)-5	5	500	35	200	1120	740	460	42
ЭКОЦ (СФОЦ)-10	10	800	35	400	1170	740	660	60
ЭКОЦ (СФОЦ)-16	16	1900	35	400	1235	740	812	95
ЭКОЦ (СФОЦ)-25	24	2500	35	500	1300	740	812	100
ЭКОЦ (СФОЦ)-40	47	3500	50	800	1600	740	1062	208
ЭКОЦ (СФОЦ)-60	70	4000	65	950	1600	740	1062	215
ЭКОЦ (СФОЦ)-100	96	5000	70	1100	2150	740	1305	259
ЭКОЦ-160	165	7500	85	1500	2150	740	1305	292
ЭКОЦ-250	250	10000	100	1700	2750	740	1538	547

Примечание: электрокалориферные установки ЭКОЦ (СФОЦ) укомплектованы радиальными вентиляторами ВР-80-75 (ВР86-77) и электрокалориферами ЭКО; температура воздуха на выходе: до +50°С; максимально допустимая температура на поверхности нагревателя 450°С; напряжение сети 380 В; число фаз 3; частота тока 50 Гц; электрическая прочность изоляции 17 кВт.

Таблица П. 28

### Комплектация электрокалориферных установок ЭКОЦ (СФОЦ) вентиляторами

Марка установки	Марка вентилятора	Мощность вентилятора, кВт	Частота вращения, об/мин
ЭКОЦ (СФОЦ)-5	ВР-80-75-2,5	0,25	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-10	ВР-80-75-3,15	0,37	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-16	ВР-80-75-3,15	0,55	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-25	ВР-80-75-4	1,1	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-40	ВР-80-75-5	1,5	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-60	ВР-80-75-5	2,5	1500
ЭКОЦ (СФОЦ)-100	ВР-80-75-6,3	5,5	1500
ЭКОЦ-160	ВР-80-75-6,3	7,5	1500
ЭКОЦ-250	ВР-80-75-8	7,5	1000

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Алиферов, А. И. Электроконтактный нагрев / А. И. Алиферов, С. Лу-пи. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 224 с.
2. Баранов, Л. А. Светотехника и электротехнология : учебное пособие / Л. А. Баранов, В. А. Захаров. – М. : КолосС, 2006. – 344 с.
3. Басов, А. М. Электротехнология : учебное пособие / А. М. Басов, В. Г. Быков, А. В. Лаптев, В. Б. Файн. – М. : Агропромиздат, 1985. – 256 с.
4. Васильев, С. И. Электротехника и электроника : учебное пособие / С. И. Васильев, И. В. Юдаев, С. В. Машков. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2017. – 252 с.
5. Васильев, С. И. Электротехника и электроника. Ч. 1. Линейные электрические цепи : учебное пособие / С. И. Васильев, И. В. Юдаев. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2016. – 133 с.
6. Гайдук, В. Н. Практикум по электротехнологии : учебное пособие / В. Н. Гайдук, В. Н. Шмигель. – М. : Агропромиздат, 1989. – 175 с.
7. Гриднева, Т. С. Автоматика : учебное пособие / Т. С. Гриднева, С. С. Нугманов, С. В. Машков, П. В. Крючин. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2016. – 108 с.
8. Живописцев, Е. Н. Электротехнология и электрическое освещение : учебное пособие / Е. Н. Живописцев, О. А. Косицын. – М. : Агропромиздат, 1990. – 303 с.
9. Заяц, Е. М. Расчеты электротехнологического оборудования : учебное пособие / Е. М. Заяц, В. А. Карасенко, И. Б. Дубодел. – Минск : Техно-принт, 2001. – 203 с.
10. Изаков, Ф. Я. Практикум по применению электрической энергии в сельском хозяйстве : учебное пособие / Ф. Я. Изаков, В. А. Козинский, А. В. Лаптев [и др.]. – М. : Колос, 1972. – 304 с.
11. Ильюхин, М. С. Теплоснабжение отраслей АПК : учебное пособие для повышения квалификации специалистов. – М. : Агропромиздат, 1990. – 175 с.
12. Карасенко, В. А. Электротехнология : учебное пособие / В. А. Карасенко, Е. М. Заяц, А. Н. Баран, В. С. Корко. – М. : Колос, 1992. – 304 с.
13. Ксенофонтов, А. Г. Расчет и конструирование нагревательных устройств. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 503 с.
14. Кудрявцев, И. Ф. Электрический нагрев и электротехнология : учебное пособие / И. Ф. Кудрявцев, В. А. Карасенко. – М. : Колос, 1975. – 384 с.
15. Лекомцев, П. Л. Курсовое проектирование по электротехнологии : учебное пособие. – Ижевск, 2002. – 77 с.

16. Проценко, П. П. Электротехнологические промышленные установки : методические указания. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2013. – 70 с.
17. Романов, Д. И. Электроконтактный нагрев металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1981. – 166 с.
18. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагрева : учебное пособие для вузов / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, И. А. Павлов, А. В. Бамунэр ; под. ред. А. Е. Слухоцкого. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 328 с.
19. Суворин, А. В. Электротехнологические установки : учебное пособие. – М. : ИНФРА-М ; Красноярск : Сиб. федеральный ун-т, 2018. – 376 с.
20. Чёба, Б. П. Светотехника и электротехнология. Ч. 2. Электротехнология : методическое пособие к практическим занятиям. – Зерноград : ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2007. – 113 с.
21. Чередниченко, В. С. Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Упражнения и задачи : учебное пособие / В. С. Чередниченко, А. И. Алиферов, В. А. Сеницын [и др.] ; под. ред. В. С. Чередниченко, А. И. Алиферов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 570 с.
22. Юдаев, И. В. Основы электротермии : учебное пособие / И. В. Юдаев, Е. Н. Живописцев, А. М. Глушков. – Волгоград : Волгоградская ГСХА, 2011. – 160 с.
23. Юдаев, И. В. Электрический нагрев: основы физики процессов и конструктивных расчетов : учебное пособие / И. В. Юдаев, Е. Н. Живописцев. – СПб. : Лань, 2018. – 196 с.

# Алфавитно-предметный указатель

## «

«Горячий режим», 157  
«Живое» сечение, 130

## А

Агрегат, 147  
Активное вентилирование, 141, 142,  
145, 146, 147, 148-150, 189, 216  
Аналитический метод определения  
диаметра провода, 85  
Атомы, 7  
Аэрация межзерновых пространств,  
146

## Б

Бункер, 147

## В

Вихревые токи, 157, 158, 159  
Водогрейные электродкотлы, 66  
Водонагреватель  
непроточный, 66  
проточный, 67  
Воздух, 10, 11, 13, 22, 33, 34, 36, 37,  
65, 88, 91, 92, 102, 106, 109, 115,  
116, 118, 120, 121, 122, 123, 124,  
125, 126, 128, 129, 130, 131, 132,  
133, 134, 137, 139, 140, 142, 143,  
144, 145, 146, 147, 148, 149, 150,  
151, 152, 153, 155, 183, 189, 197,  
198, 199, 201, 202, 208, 216  
Воздухообмен, 118  
Вытяжные системы вентиляции, 119

## Г

Газ, 6, 9, 10, 11, 13  
Генератор, 161, 167, 169, 170, 175,  
205  
Гипотеза Фурье, 6  
Глубина проникновения тока, 40,  
157, 190  
Графо-аналитический метод  
определения диаметра провода,  
86

## Д

Деталь, 29, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47,  
49, 59, 60, 61, 98, 156, 158, 159,  
160, 161, 162, 163, 164, 173  
Деформация, 50, 88  
Диаметр контактной поверхности  
электрода, 50  
Диффузия, 16  
Диэлектрический нагрев, 164, 185  
Длина спирали, 89, 90, 100, 102,  
103, 107

## Е

Естественная вентиляция, 118

## Ж

Жидкость, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 88

## З

Закалочные трещины, 51  
Закон  
Джоуля-Ленца, 38  
Стефана-Больцмана, 13

Закрома, 146  
Зерно, 145, 146, 147, 149, 168, 189

## И

Индуктивность соленоида, 158  
Индуктор, 159, 175  
Индукционные нагреватели  
средней и высокой частоты, 161

## К

Конвекция, 6, 9  
Контактная стыковая сварка, 48  
Косвенный электрический нагрев  
сопротивлением, 81  
Коэффициент  
монтажа, 90  
среды, 87, 90  
Кристаллическая решетка, 7  
Критерий  
Нуссельта, 10, 11, 91, 92, 107, 128,  
137  
Прандтля, 10  
Рейнольдса, 10, 92

## Л

Ликвидация самосогревания зерна,  
145

## М

Массообмен, 16  
Металл, 7, 13, 39, 50, 53, 54, 156,  
197  
Микроклимат, 118, 124  
Мощность, 15, 17, 19, 20, 27, 28, 29,  
31, 32, 33, 35, 36, 37, 41, 44, 45,  
46, 47, 50, 53, 54, 55, 58, 61, 64,  
66, 67, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79,  
80, 82, 84, 85, 86, 87, 90, 91, 93,  
94, 95, 97, 98, 99, 104, 105, 106,

108, 109, 110, 111, 112, 113, 114,  
115, 116, 117, 127, 128, 129, 131,  
132, 133, 138, 139, 140, 146, 147,  
148, 149, 150, 151, 152, 153, 154,  
155, 157, 159, 161, 164, 166, 167,  
168, 169, 170, 171, 173, 174, 175,  
179, 180, 181, 183, 194, 195, 205,  
206, 207

## Н

Напряжение, 19, 42, 44, 47, 63, 66,  
81, 89, 90, 95, 97, 110, 112, 114,  
115, 160  
Наружный диаметр трубки, 90, 91,  
107

## О

Обмотка, 42, 59, 61, 174  
Объем, 22, 116  
Оребрение, 12, 91, 92, 107, 108, 117,  
128, 138, 144  
Относительная магнитная  
проницаемость, 40, 55, 61

## П

Параметры индуктора, 158  
Парник, 104, 151, 152, 153, 154, 155,  
189, 216  
Паровые электродкотлы, 66  
Поверхностный эффект, 39, 44, 53,  
54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62,  
104  
Полевая сушка, 141  
Полная длина ТЭНа, 91, 107  
Помещения защищенного грунта,  
151  
Пористые материалы, 7  
Потери теплоты, 22, 24, 37, 124, 125,  
131, 132, 151

Приточная принудительная вентиляция, 119  
Проводник, 41, 63  
Продолжительность сжатия деталей, 51  
Промораживание зерна, 145  
Птичник, 119, 123

## Р

Расчётная площадь электродов, 69

## С

Сварка  
на «жестком» режиме, 49  
на «мягком» режиме, 49  
Свинарник, 120  
Сено, 141, 142, 143, 144, 145, 148, 149, 150, 216  
Система «деталь-индуктор», 160  
Спротивление  
контакта, 48  
проводника, 38  
Средний диаметр витков спирали, 90, 107  
Сушка зерна подогретым воздухом, 146  
Сушка сена, 141  
Схема соединения  
«звезда», 97, 100, 109, 111  
«двойная звезда», 111, 112  
«последовательная звезда», 113  
«треугольник», 97  
«двойной треугольник», 112, 113  
«последовательный треугольник», 114

## Т

Твердые тела, 7  
Тело  
абсолютно черное, 13

серое, 13, 14  
Температурно-влажностный режим, 118  
Температурный коэффициент сопротивления, 39, 61  
Температурный напор, 10  
Теплица, 151, 189  
Тепловая изоляция, 17, 22, 23, 30, 33, 34, 36, 37, 45, 88, 99  
Тепловое излучение, 6, 13  
Тепловой поток, 9, 14, 18, 25, 26, 32, 34, 35, 125, 126, 131, 137, 153, 200  
Тепловой расчёт, 17  
Теплообмен, 6, 9, 10, 12, 15, 26, 128, 129  
Теплопроводность, 6, 7, 8, 9, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 33, 37, 51, 81, 93, 152, 153, 164  
Термический КПД, 21, 45, 174  
Ток, 16, 17, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 87, 90, 155, 156, 157, 159, 174, 175, 186, 206, 208  
Толщина закаливаемого слоя, 161, 162  
Толщина свариваемых деталей, 49, 51  
Точечная контактная электрическая сварка, 49  
Точка Кюри, 41  
Трансформатор, 42, 43, 44, 46, 47, 51, 57, 58, 59, 60, 61, 156, 160, 161  
Трубчатые электронагреватели, 12, 88, 127

## У

Удельное электрическое сопротивление, 38, 58, 64, 72, 73,

74, 75, 76, 79, 81, 102, 104, 191,  
207

Усилие сжатия, 51

## Ф

Формула

Ньютона-Рихмана, 9

Штейнметца, 156

## Ч

Часовая паропроизводительность,  
182

## Ш

Шаг витков, 89, 90, 107

## Э

Электродный нагрев, 63, 66, 215

Электрокалорифер, 91, 127, 137,  
139, 144, 145, 147, 148, 149, 150,  
183

Электроконтактный нагрев, 41, 42,  
45, 58, 209

Электрокотлы, 66, 178

Электромагнитная волна, 39, 55, 62,  
156, 157, 158, 164, 175

Электронагрев, 5, 38, 63, 65, 176,  
177, 185, 186

Электронагревательная установка,  
17

Электротехнологические установки  
(оборудование), 5

Электротехнология, 4

Электроэнергия, 5, 168, 169, 177,  
186

# Оглавление

Предисловие.....	3
Введение .....	4
1. Основы теплового расчета электротермических установок .....	6
1.1. Общие положения из теории массо- и теплопередачи .....	6
1.2. Общие положения теплового расчета электронагревательных установок .....	16
Примеры решения задач .....	23
Контрольные задания .....	35
2. Электрический нагрев сопротивлением металлических проводников.....	38
2.1. Общие сведения из теории электропроводности проводников первого рода .....	38
2.2. Расчет установок электроконтактного нагрева .....	41
2.3. Расчет установок для электроконтактной сварки .....	48
Примеры решения задач .....	52
Контрольные задания .....	60
3. Электрический нагрев проводников второго рода. Электродный нагрев.....	63
3.1. Общие сведения из теории электропроводности проводников второго рода .....	63
3.2. Расчет электродных водонагревателей и парообразователей ....	65
Примеры решения задач .....	70
Контрольные задания .....	79
4. Косвенный нагрев сопротивлением .....	81
4.1. Открытые нагревательные элементы из специальных сплавов и методы их расчета .....	81
4.2. Трубчатые электрические нагреватели и методы их расчета ...	89
4.3. Схемы включения нагревательных элементов и способы регулирования мощности электротермических установок .....	95
Примеры решения задач .....	97
Контрольные задания .....	115
5. Расчет вентиляции и отопления в животноводческих и птицеводческих помещениях .....	118
5.1. Общие положения и сведения из теории вентиляции и отопления в животноводческих и птицеводческих помещениях.....	118
5.2. Расчет системы вентиляции помещения для содержания животных или птицы .....	121
5.3. Расчет системы отопления помещения для содержания животных или птицы .....	124
5.4. Расчет электрокалориферной установки .....	127



5.4.1. Тепловой расчет нагревательных элементов .....	127
5.4.2. Конструктивный расчет нагревательного блока .....	130
Примеры решения задач .....	131
Контрольные задания .....	139
6. Расчет мощности электрокалориферной установки для сушки сена активным вентилированием .....	141
6.1. Общие сведения о методике расчета установок для активного вентилирования.....	141
Примеры решения задач .....	148
Контрольные задания .....	150
7. Расчет теплового режима парников .....	151
7.1. Общие сведения из теории расчета теплового режима парников.....	151
Примеры решения задач .....	152
Контрольные задания .....	154
8. Индукционный и диэлектрический нагрев .....	156
8.1. Общие сведения из теории расчета установок индукционного нагрева .....	156
8.2. Общие сведения из теории расчета установок диэлектрического нагрева .....	164
Примеры решения задач .....	170
Контрольные задания .....	173
9. Расчет и выбор электротермических установок, используемых в сельскохозяйственном производстве .....	176
9.1. Общие сведения об электротермических установках сельскохозяйственного назначения.....	176
Примеры решения задач .....	179
Контрольные задания .....	183
Термины и определения электротермии .....	186
Приложения.....	188
Рекомендуемая литература.....	210
Алфавитно-предметный указатель.....	212

Учебное издание

**Юдаев Игорь Викторович  
Машков Сергей Владимирович  
Фатхутдинов Марат Рафаилович**

# **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ**

**Учебное пособие**

Подписано в печать 30.11.2018. Формат 60×841/16

Усл. печ. л. 12,7, печ. л. 13,6.

Тираж 500. Заказ №330.

Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО Самарской ГСХА  
446442, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2  
E-mail: ssaariz@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО»  
443086, г. Самара, ул. Песчаная, 1  
Тел.: (846) 267-36-82