



Министерство образования
Республики Беларусь

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра «Машины и технология обработки металлов
давлением»**

**М.В. Логачёв
Н.И. Иваницкий
Л.М. Давидович**

РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие

Часть 2

Минск 2010

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»

М.В. Логачёв
Н.И. Иваницкий
Л.М. Давидович

РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей

1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением»,
1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

В 3 частях

Часть 2

РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И УСТАНОВОК

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по металлургическому оборудованию и технологиям*

Минск 2010

УДК 621.783.2001.63(075.8)

ББК 34.651я7

Л 69

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Республики Беларусь,
доктор технических наук, профессор *Ф.И. Пантелеенко*;
кандидат технических наук, доцент кафедры

«Машины и технология литейного производства» *А.Н. Крутилин*

Логачев, М.В.

Л 69 Расчеты нагревательных устройств: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением», 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»: в 3 ч. / М.В. Логачев, Н.И. Иваницкий, Л.М. Давидович. – Минск: БНТУ, 2010. – Ч.2: Расчеты электрических печей и установок. – 131 с.

ISBN 978-985-525-228-4 (Ч.2).

В учебно-методическом пособии рассмотрена классификация электрических промышленных печей, даны основы расчета электрических печей сопротивления косвенного и прямого действия, приведены методы определения времени нагрева заготовок, основных размеров печного пространства и внешних габаритов печей, составления энергетического баланса и определения установочной мощности. Дана характеристика материалов для нагревательных элементов электрических печей сопротивления. Представлена методика и примеры расчета электрических печей сопротивления.

Пособие предназначено для студентов металлургических, машиностроительных и энергетических специальностей, а также для работников промышленности.

Часть 1 настоящего издания «Расчет пламенных печей» вышла в БНТУ в 2007 г., часть 3 «Основы расчета и выбора механического оборудования нагревательных и термических печей» – в БНТУ в 2008 г.

УДК 621.783.2001.63(075.8)
ББК 34.651я7

ISBN 978-985-525-228-4 (Ч.2)

ISBN 978-985-479-553-9

© Логачев М.В., Иваницкий Н.И.,
Давидович Л.М., 2010

© БНТУ, 2010

Введение

Электрические печи и электронагревательные устройства получили широкое распространение в машиностроении и металлургии для расплавления металлов и сплавов и нагрева различных материалов, заготовок или изделий под пластическую деформацию или термическую обработку.

Такое широкое распространение электрических печей вызвано следующими их существенными преимуществами по сравнению с топливными печами.

1. Возможность концентрировать выделение большого количества энергии в весьма малых объемах (электрическая дуга, низкотемпературная плазма, индукционный нагрев, электронно-лучевой нагрев, прямой нагрев) и благодаря этому получить очень большие скорости нагрева и любые необходимые температуры.

2. Возможность обеспечить высокую равномерность нагрева изделий как путем соответствующего расположения источника выделения тепла по стенкам нагревательной камеры, так и применением принудительной циркуляции атмосферы.

3. Легкость регулирования подводимой мощности, а следовательно, и температуры, легкость автоматизации регулирования температурного режима печи.

4. Удобство механизации и автоматизации процессов загрузки и выгрузки подвергающихся нагреву материалов или изделий и их перемещения внутри печи, что существенно облегчает включение электрических печей в технологический поток и автоматические линии.

5. Легкость герметизации электрических печей, возможность благодаря этому защитить нагреваемые материалы или детали от окисления защитной атмосферой или вакуумом или, наоборот, поместить их в специальную атмосферу для насыщения поверхности углеродом, азотом или иными веществами.

6. Компактность, чистота, удобство обслуживания, улучшение условий труда, меньшее по сравнению с топливными печами загрязнение атмосферы.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Широкое распространение электрических печей в различных отраслях народного хозяйства (табл. 1.1), разнообразие их конструкций, размеров, принципа действия, назначения и рода обрабатываемых в них материалов или деталей затрудняет их классификацию [1].

Таблица 1.1

Область применения электрических печей

Отрасли промышленности	Процессы	Применяемое оборудование
1	2	3
Металлургия черных, цветных и легких металлов	Выплавка качественных сталей	Крупнейшие механизированные дуговые сталеплавильные печи прямого действия. Вакуумные индукционные и дуговые печи. Электрошлаковые и плазменные установки
	Выплавка цветных и легких сплавов	Индукционные, тигельные и каналные печи, электрические печи сопротивления косвенного действия
	Выплавка редких металлов и титана	Вакуумные дуговые печи, электронно-лучевые установки
	Производство ферросплавов, никеля, меди, цинка, олова и других материалов	Дуговые печи сопротивления (рудно-термические)
	Производство электрографита	Электрические печи сопротивления прямого действия
	Порошковая металлургия, твердые сплавы	Электрические печи сопротивления косвенного действия
Машиностроение (точное, тяжелое, транспортное, станкостроение, авиация, электропромышленность и промышленность средств связи)	Термическая обработка металлов, стекла и других материалов	Электрические печи сопротивления прямого и косвенного действия, универсальные и специализированные, аппараты индукционные для поверхностной закалки и сквозного нагрева. Вакуумные печи сопротивления и индукционные

1	2	3
	Стальное фасонное литье	Дуговые сталеплавильные печи средние и мелкие, индукционные тигельные и каналные печи
	Цветное фасонное литье	Дуговые однофазные печи косвенного действия, мелкие и средние индукционные печи, каналные и тигельные
	Литье из легких сплавов	Электрические печи сопротивления косвенного действия, индукционные каналные
	Кабельное производство	Электрические печи сопротивления косвенного действия
	Нагрев под ковку и штамповку	Индукционные аппараты для сквозного нагрева, электрические печи сопротивления прямого и косвенного действия
	Производство алунда и карборунда	Дуговые печи сопротивления, электрические печи сопротивления прямого действия
	Сушка литейных стержней и форм, дерева и других материалов	Установки диэлектрического нагрева, электронные печи сопротивления
	Нагрев пластмасс и различных изоляционных материалов	Установки диэлектрического нагрева
Химическая промышленность	Производство карбида кальция, цианамиды, фосфора, сероуглерода и т.п.	Дуговые печи сопротивления
	Производство синтетического волокна, парфюмерное и синтетическое производство	Электрические печи сопротивления косвенного действия, установки диэлектрического нагрева
	Производство пластмасс, синтетических смол, вулканизация резины	Электрические печи сопротивления косвенного действия, установки диэлектрического нагрева

1	2	3
Пищевая промышленность	Хлебопечение, предприятия общественного питания	Электрические печи сопротивления косвенного действия
	Производство консервов, копчение рыбы	Индукционные установки, установки диэлектрического нагрева
Легкая промышленность	Нагрев пластмасс, стекла и других металлов	Установки диэлектрического нагрева, электрические печи сопротивления косвенного действия
Строительная промышленность	Производство стекла, муллита	Электрические печи сопротивления прямого действия, дуговые печи сопротивления
	Электропрогрев бетона	Метод сопротивления прямого действия
	Каменное литье	Дуговые печи сопротивления, электрические печи сопротивления косвенного действия
Мелкие машиностроительные заводы, мастерские главного механика и главного энергетика	Фасонное стальное литье	Мелкие дуговые сталеплавильные печи, индукционные печи
	Фасонное цветное литье	Однофазные дуговые печи косвенного действия, индукционные печи
	Термическая обработка металлов	Универсальные электрические печи сопротивления косвенного действия
	Нагрев изделий из пластмасс, резины, кожзаменителей	Электрические печи сопротивления косвенного действия, установки диэлектрического нагрева
Сельское хозяйство	Обогрев помещений молодняка, инкубаторы, парники, приготовление кормов, подогрев воды	Электрические печи сопротивления прямого и косвенного действия

1	2	3
Научно-исследовательские институты, заводские и учебные лаборатории	Химические, физические, механические и технологические испытания	Лабораторные электрические печи сопротивления косвенного действия, термостаты, вакуумные шкафы. Лабораторные индукционные плавильные печи. Лабораторные дуговые печи, плазменные установки для испытания материалов
Бытовые электронагревательные приборы	Приготовление пищи, обогрев помещений, подогрев воды, прочие бытовые нужды	Электрические печи сопротивления косвенного действия, электроплитки, чайники, кастрюли, утюги, калориферы, электрокотлы и пр. Высокочастотные индукционные плиты

Поэтому ограничимся наиболее общим подразделением всех печей и электронагревательных установок на три группы – плавильные, термические и нагревательные. Более правильной и удобной будет классификация электрических печей по принципиальному признаку – способу превращения электрической энергии в тепловую (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Классификация электрических промышленных печей
(по способу превращения электрической энергии в тепловую)**

Электрические печи сопротивления	Электрические дуговые печи	Электрические дуговые печи сопротивления	Индукционные и диэлектрического нагрева установки	Электронно-лучевые установки
Электрическая энергия превращается в тепловую при протекании тока через твердые или жидкие тела в соответствии с эффектом Джоуля	Электрическая энергия превращается в тепловую и в дуговом или плазменном разряде, и в газовой среде или в парах металла	Электрическая энергия превращается в тепловую и в дуговом разряде, и при протекании тока в твердых и жидких телах	Электрическая энергия превращается в энергию быстрого переменного магнитного или электрического полей, а затем в тепловую в нагреваемых телах, помещенных в этих полях	Электрическая энергия электронного пучка превращается в тепловую в телах, бомбардируемых электронами пучка

Как видно из табл. 1.2, электрические промышленные печи делятся на пять классов, причем в машиностроении чаще используются электрические печи сопротивления и установки индукционного нагрева.

Классификация электрических печей сопротивления приведена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация электрических печей сопротивления

2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОСВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Почти все электрические печи сопротивления косвенного действия имеют нагревательные элементы того или иного типа, в которых и происходит превращение электрической энергии в тепловую, передаваемую в дальнейшем нагреваемым заготовкам (изделиям) излучением, конвекцией или теплопроводностью. На рис. 2.1 представлена камерная электрическая печь сопротивления.

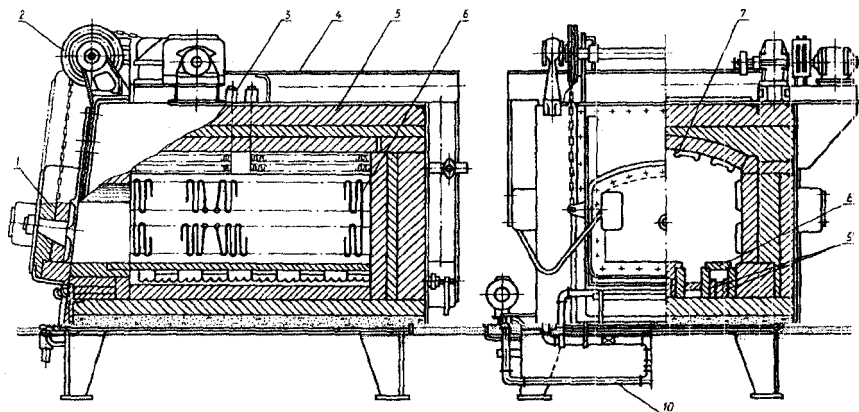


Рис. 2.1. Камерная электропечь:

- 1 – дверца; 2 – механизм подъема дверцы; 3 – ввод термопары; 4 – кожух; 5 – футеровка; 6 – боковые нагреватели; 7 – сводовые нагреватели; 8 – подовые плиты; 9 – подовые нагреватели; 10 – пламенная завеса

Расчет электрических путей сопротивления включает определение времени нагрева изделий, определение основных размеров печного пространства и внешних габаритов печи, составление энергетического баланса и установочной мощности печи и расчет нагревательных элементов [2].

2.1. Определение времени нагрева заготовок в печах периодического действия

Время нагрева определяется по-разному для тонких и массивных заготовок (изделий) по методикам аналогично с пламенными печами [3], но с учетом некоторых особенностей.

На рис. 2.2 показаны температурные графики нагрева заготовок (изделий) при постоянной температуре печи.

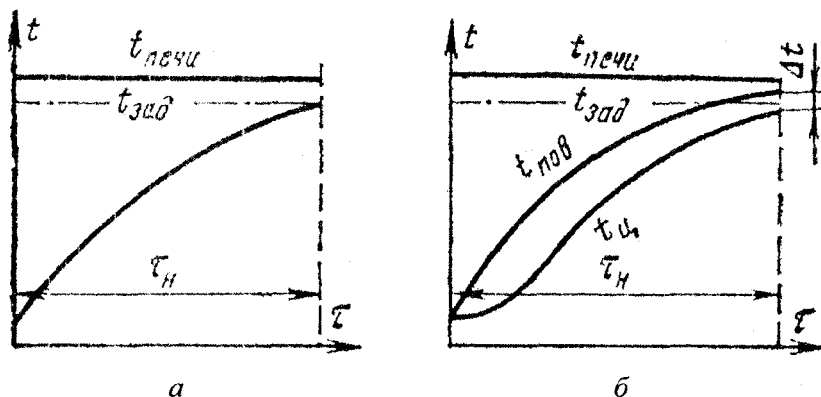


Рис. 2.2. График нагрева изделий в печи периодического действия при постоянной температуре печи:

а – тонкие изделия; *б* – массивные изделия

Нагрев тонких изделий

В действительности нагрев изделий в электрических печах сопротивления с самого начала происходит при постоянной температуре лишь в редких случаях, когда тепловоспринимающая способность изделий низка (длительный режим нагрева), или при существенном недоиспользовании печи, работающей в режиме, приближающемся к холостому ходу, а также при ее загрузке и разгрузке малыми порциями. Если же печь периодического действия загружается нормально и притом в один прием, то при этом происходит резкое снижение температуры в камере, что обуславливает существенное увеличение времени нагрева изделий по сравнению со временем нагрева при постоянной температуре печи (рис. 2.3).

Поэтому в электрических печах периодического действия процесс нагрева приходится разбивать на два этапа. Первый этап – от начала нагрева до достижения в камере печи заданной температуры – характеризуется тем, что вследствие низкой температуры садки, последняя поглощает всю выделяющуюся в камере печи полезную мощность (мощность печи минус тепловые потери). В этот период температура

печи меняется, она медленно поднимается к заданному значению, терморегулятор не работает, а так как при этом мощность печи остается постоянной. (ее тепловые потери в первом предположении также можно считать постоянными), то, следовательно, мы будем иметь дело с режимом нагрева при постоянном тепловом потоке.

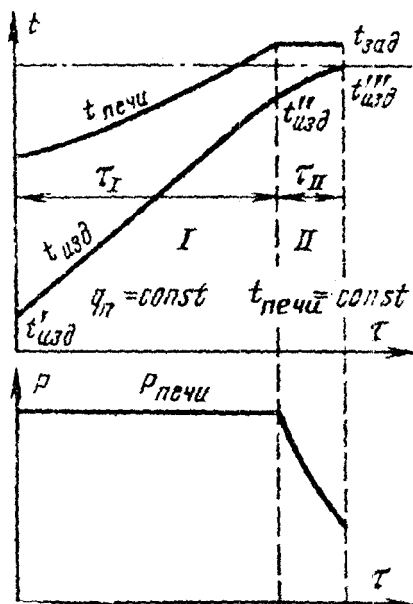


Рис. 2.3. График нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия

Значение этого теплового потока определяется по формуле

$$q_n = (P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}) \frac{1}{F_{\text{изд}}}, \quad (2.1)$$

где q_n – постоянный тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделий;

$P_{\text{печи}}$ – мощность печи;

$P_{\text{пот}}$ – мощность тепловых потерь печи;

$F_{\text{изд}}$ – тепловоспринимающая поверхность изделий.

Если речь идет о высокотемпературной печи, то влиянием естественной конвекции в ней можно пренебречь и уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$q_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.2)$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент лучеиспускания;

$T_{\text{печи}}$ и $T_{\text{изд}}$ — текущие значения температур печи и изделия.

Так как изделие находится в камере печи и его поверхность обычно намного меньше поверхности стен последней, то в соответствии с [1]

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\epsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{печи}}} \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)}. \quad (2.3)$$

Степень черноты стен печной камеры и нагревателей близка к 0,9, $F_{\text{изд}}$ существенно меньше $F_{\text{печи}}$, поэтому во многих случаях с достаточной для практических целей точностью можно принять

$$C_{\text{пр}} = 5,76\epsilon_{\text{изд}} = C_{\text{изд}}. \quad (2.4)$$

В тех же случаях, когда $F_{\text{изд}}$ и $F_{\text{печи}}$ близки друг к другу, приведенный коэффициент лучеиспускания будет

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{1/\epsilon_{\text{изд}} + 1/\epsilon_{\text{печи}} - 1}.$$

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. При этом для тонких изделий их температура в соответствии с формулой (2.2) может быть определена по выражению

$$t_{\text{изд}}'' = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}''}{100} \right)^4 - \frac{q_{\text{п}}}{C_{\text{пр}}} - 273}. \quad (2.5)$$

Количество тепла, воспринятое изделием за период первого этапа, будет равно $q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1$, где τ_1 – длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделий от начальной температуры $t'_{\text{изд}}$ до $t''_{\text{изд}}$, поэтому можно написать

$$q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1 = Gc(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}),$$

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{Gc(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})}{q_{\text{п}} F_{\text{изд}}}, \quad (2.6)$$

где G – масса изделий;

c – средняя удельная теплоемкость.

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией необходимо учитывать конвекцию, поэтому уравнение теплопередачи удобнее переписать в иной форме:

$$q_{\text{п}} = (\alpha_{\text{изд}} + \alpha_{\text{конв}})(t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}),$$

где $q_{\text{п}}$ может быть определен из формулы (2.1);

$\alpha_{\text{изд}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, может быть определен по формуле

$$\alpha_{\text{изд}} = C_{\text{пр}} \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}}. \quad (2.7)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{конв}}$ может быть рассчитан в зависимости от характера конвекции, формы изделий и параметров среды [1]. В печах с естественной конвекцией он меняется сравнительно мало и в среднем может быть принят равным $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Учитывая это, для момента времени, соответствующего достижению температурой печи заданного значения $T''_{\text{печи}}$, будем иметь

$$q_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T''_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T''_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] + 10(t''_{\text{печи}} - t'_{\text{изд}}). \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) действительно, если поверхности изделий, воспринимающие тепло излучением и конвекцией, равны, что обычно имеет место для тонких изделий.

Из формулы (2.8) может быть определена температура изделия в момент окончания регулярного режима $T''_{\text{изд}}$.

Длительность первого этапа τ_1 , как и раньше, может быть определена из формулы (2.6).

По достижении печью заданного значения температуры начинает работать терморегулятор, поддерживая ее неизменной, мощность печи при этом начинает снижаться. Следовательно, в течение второго этапа работы нагрев изделий осуществляется при постоянной температуре печи (см. рис. 2.2).

Для высокотемпературных печей уравнение баланса может быть написано следующим образом:

$$dQ = C_{\text{пр}} F_{\text{изд}} \left[\left(\frac{T''_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T''_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] d\tau = GcdT.$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$\tau_2 = \frac{Gc}{F_{\text{изд}} C_{\text{пр}}} \frac{100}{(T_{\text{печи}}/100)^3} \left[\frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}}}{1 - \frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}}} + \frac{1}{2} \arctg \frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} - \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T''_{\text{печи}}}{T_{\text{изд}}}}{1 - \frac{T''_{\text{печи}}}{T_{\text{изд}}}} - \frac{1}{2} \arctg \frac{T''_{\text{печи}}}{T_{\text{изд}}} \right] = \frac{Gc}{F_{\text{изд}} C_{\text{пр}}} \frac{100}{(T_{\text{печи}}/100)^3} \left[\Psi \left(\frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} \right) - \Psi \left(\frac{T''_{\text{печи}}}{T_{\text{изд}}} \right) \right], \quad (2.9)$$

здесь $T''_{\text{изд}}$ – абсолютная температура изделий в начале второго периода нагрева, а $T'''_{\text{изд}}$ – в его конце. Если весь нагрев протекает при постоянной температуре печи, $T''_{\text{изд}}$ будет представлять собой абсолютную температуру изделий в начале нагрева, а $T'''_{\text{изд}}$ – в его конце.

Значения функции $\Psi(T_{\text{изд}}/T_{\text{печи}})$ даны в табл. 2.1. По формуле (2.9), задавшись значением $T'''_{\text{изд}}$ – окончательной температурой нагрева, можно получить необходимое для этого время τ_{II} , или, наоборот, задавшись временем τ_{II} , определить $\Psi(T'''_{\text{изд}}/T_{\text{печи}})$ и из табл. 2.1 – соответствующее этой функции значение $T''_{\text{изд}}$.

Таблица 2.1

$$\Psi(Y) = \frac{1}{4} \ln \frac{1+Y}{1-Y} + \frac{1}{2} \arctg Y$$

Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$
0,20	0,2000	0,50	0,5066	0,80	0,8864	0,990	1,713
0,22	0,2201	0,52	0,5277	0,82	0,9224	0,992	1,770
0,24	0,2402	0,54	0,5497	0,84	0,9599	0,994	1,842
0,26	0,2602	0,56	0,5718	0,86	1,0020	0,996	1,944
0,28	0,2803	0,58	0,5938	0,88	1,0389	0,998	2,117
0,30	0,3005	0,60	0,6166	0,90	1,1024	0,999	2,293
0,32	0,3207	0,62	0,6400	0,91	1,1332	0,9995	2,465
0,34	0,3409	0,64	0,6639	0,92	1,1659	–	–
0,36	0,3612	0,66	0,6882	0,93	1,2046	–	–
0,38	0,3816	0,68	0,7132	0,94	1,2463	–	–
0,40	0,4022	0,70	0,7389	0,95	1,2959	–	–
0,42	0,4226	0,72	0,7655	0,96	1,3563	–	–
0,44	0,4434	0,74	0,7936	0,97	1,431	–	–
0,46	0,4642	0,76	0,8229	0,98	1,537	–	–
0,48	0,4854	0,78	0,8538	0,985	1,612	–	–

Примечание. При $Y < 0,20$ $\Psi(Y) = Y$.

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией воздуха проф. Б.В. Старком было предложено следующее дифференциальное уравнение:

$$dQ = \alpha F_{\text{изд}} (t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}) d\tau = Gc dt ;$$

интегрирование этого уравнения дает

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha F_{\text{изд}}} \ln \left(\frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}''}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}'''} \right). \quad (2.10)$$

В формуле (2.10) $t_{\text{изд}}''$ и $t_{\text{изд}}'''$ – температуры изделий в начале и конце рассматриваемого периода – известны, так же как и температура печи $t_{\text{печи}}$. Незвестным для определения τ_2 остается значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}$. Последнее определяется как среднее арифметическое из значений α для начала и конца периода, когда $t_{\text{изд}} = t_{\text{изд}}''$ и $t_{\text{изд}} = t_{\text{изд}}'''$ соответственно. Значения $\alpha_{\text{изл}}$ для этих моментов времени могут быть вычислены из формулы (2.7), а $\alpha_{\text{конв}}$ в первом приближении принято равным 10 Вт/(м²·°С) или определено по соответствующим формулам.

Построение кривой температуры нагрева тонких изделий при постоянной температуре печи может быть также проведено графическим методом по участкам. В самом общем виде уравнение баланса для интервала температур $(t_{i-1}; t_i)$ может быть написано как

$$Q_i = Gc_i (t_{\text{изд } i} - t_{\text{изд } i-1}) = \\ = C_{\text{пр}} F_{\text{изд}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд.ср } i}}{100} \right)^4 \right] \Delta\tau_{\text{нагр } i} + \alpha_{\text{конв } i} F_{\text{изд}} (t_{\text{печи}} - t_{\text{изд.ср } i}) \Delta\tau_{\text{нагр } i},$$

откуда

$$\Delta\tau_{\text{нагр } i} = \frac{Gc_i (t_{\text{изд } i} - t_{\text{изд } i-1})}{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд.ср } i}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{изд}} + \alpha_{\text{конв } i} (t_{\text{печи}} - t_{\text{изд.ср } i}) F_{\text{изд}}}. \quad (2.11)$$

Здесь обозначения прежние, следует лишь иметь в виду, что поверхности $F_{\text{изд}}$ могут быть различными: для лучистого теплообмена $F_{\text{изд}}$ представляет собой поверхность изделия, облучаемую нагревателями и стенами камеры печи, а при теплопередаче конвекцией это будет поверхность изделий, омываемая потоками воздуха.

Графическое построение показано на рис. 2.4. Разность температур $(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})$ разбивается на ряд произвольно выбранных интервалов, уменьшающихся по мере приближения к $t''_{\text{изд}}$. Для каждого из этих интервалов $(t_1 - t'_{\text{изд}}; t_2 - t_1; \dots; t_i - t_{i-1}$ и т.д.) определяется средняя температура:

$$\frac{t'_{\text{изд}} + t_1}{2}, \frac{t_1 + t_2}{2}, \dots, \frac{t_{i-1} + t_i}{2}$$

и т.д., и для этих средних температур по формуле (2.11) определяется продолжительность каждого интервала $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3$ и т.д. По этим рассчитанным значениям длительности отдельных интервалов может быть построена кривая нагрева изделия в виде ломаной линии (рис. 2.4), а сумма $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_i$ дает полное время нагрева изделий от $t'_{\text{изд}}$ до $t''_{\text{изд}}$:

$$\tau_{\text{нагр}} = \sum_{i=1}^k \Delta\tau_i.$$

Анализ кривых нагрева тонких изделий показал, что они носят характер параболы, поэтому средняя температура за время нагрева должна составить

$$t_{\text{изд.ср}} \approx t'_{\text{изд}} + \frac{2}{3}(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) = \frac{1}{3}t'_{\text{изд}} + \frac{2}{3}t''_{\text{изд}}$$

и при нагреве от комнатной температуры

$$t_{\text{изд.ср}} \approx \frac{2}{3}t''_{\text{изд}}.$$

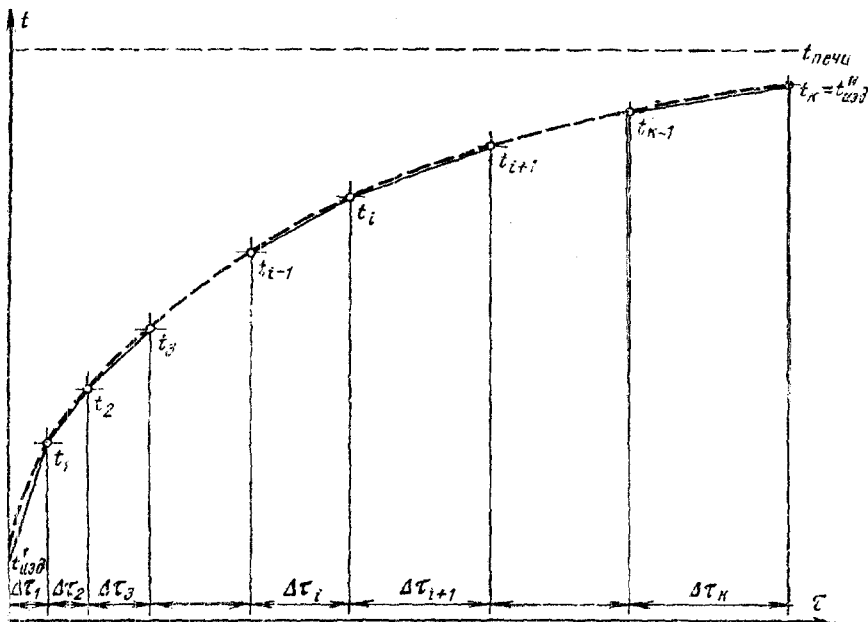


Рис. 2.4. Построение кривой нагрева тонких изделий при $t_{\text{печи}} = \text{const}$

Так как, однако, разность температуры печи и изделия к концу нагрева обычно бывает невелика, то в последнем случае можно написать

$$t_{\text{изд.ср}} \approx 0,7t_{\text{печи}},$$

откуда

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{Q}{\alpha(t_{\text{печи}} - t_{\text{изд/ср}})F_{\text{изд}}} = \frac{Gc(t_{\text{изд}}^n - t_{\text{изд}}^0)}{\alpha 0,3t_{\text{печи}}F_{\text{изд}}}. \quad (2.12)$$

Это выражение может быть использовано для приближенных расчетов в тех случаях, когда конечная температура нагрева изделий близка к температуре печи.

С достаточной для практических расчетов точностью можно, перейдя к абсолютным температурам, написать $T_{\text{изд.ср}} \approx 0,8T_{\text{печи}}$ (в действительности, если $T_{\text{изд.ср}} \approx 0,7T_{\text{печи}}$, то $T_{\text{изд.ср}}$ будет меняться от

$0,85T_{\text{печи}}$ для $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и до $0,75T_{\text{печи}}$ для $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отсюда, подставив это значение $T_{\text{изд.ср}}$ в формулу (2.7), получим коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$:

$$\alpha_{\text{изд}} = C_{\text{пр}} \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд.ср}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд.ср}}} = C_{\text{пр}} \left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 \frac{1 - 0,8^4}{T_{\text{печи}}(1 - 0,8)} =$$

$$= \frac{0,59C_{\text{пр}}}{0,2T_{\text{печи}}} \left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 \approx 0,03C_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^3.$$

Нагрев массивных изделий

При нагреве массивных изделий в печах периодического действия время нагрева изделий, как и в предыдущем случае, может быть разбито на два этапа: первый этап – нагрев при постоянном тепловом потоке, и второй этап – нагрев при постоянной температуре печи (рис. 2.5).

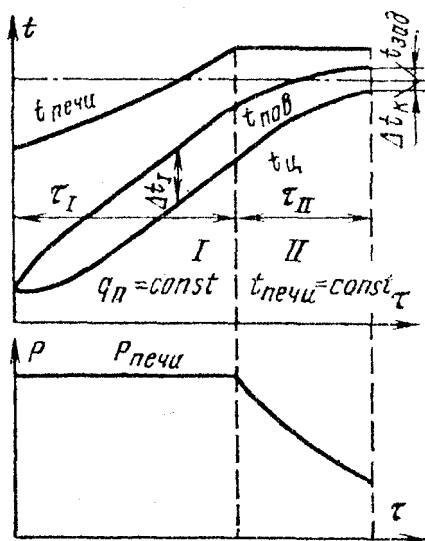


Рис. 2.5. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия

На первом этапе изделия будут нагреваться тепловым потоком q_n , который определяется по формуле (2.1). В течение времени $\tau = 0,3S^2/a$ для бесконечной пластины толщиной $2S$ и $\tau = 0,25R^2/a$ для бесконечного цилиндра радиуса R будет длиться начальный период нагрева, к концу этого периода в изделии установится регулярный режим, характеризующийся постоянным внутренним температурным перепадом, равным $\Delta t_1 = q_n S / 2\lambda$ для пластины и $\Delta t_1 = q_n R / 2\lambda$ для цилиндра (см. рис. 2.5). К концу начального и началу регулярного периода нагрева температура поверхности пластины достигнет

$$t'_{\text{пов}} = 1,27\Delta t = 1,27 q_n S / 2\lambda ,$$

а температура центра

$$t'_{\text{центр}} = 0,27\Delta t = 0,27 q_n S / 2\lambda ,$$

аналогично для цилиндра

$$t'_{\text{пов}} = 1,5\Delta t = 1,5 q_n R / 2\lambda$$

и

$$t'_{\text{центр}} = 0,5\Delta t = 0,5 q_n R / 2\lambda .$$

В дальнейшем во время нагрева в регулярном режиме температуры поверхности и центра изделия будут увеличиваться пропорционально времени с постоянной скоростью V_n , °C/ч, по закону параболы. Тогда температура на поверхности пластины при $x = S$

$$t_{\text{пов}} = q_n S / 2\lambda (2a\tau / S^2 + 2/3) ,$$

а температура его центральной плоскости

$$t_{\text{центр}} = q_n S / 2\lambda (2a\tau / S^2 + 1/3) ,$$

аналогично для бесконечного цилиндра

$$t_{\text{пов}} = q_n R / 2\lambda (4a\tau / R^2 + 1/2) \quad \text{и} \quad t_{\text{центр}} = q_n R / 2\lambda (2a\tau / R^2 + 1/2) .$$

Из этих выражений для времени нагрева в регулярном режиме получаем

$$V_H = t_{\text{пов } \tau+1} - t_{\text{пов } \tau} = \frac{q_n S}{2\lambda} \left[\frac{2a(\tau+1)}{S^2} + \frac{2}{3} \right] - \frac{q_n S}{2\lambda} \left(\frac{2a\tau}{S^2} + \frac{2}{3} \right) =$$

$$= \frac{q_n S 2a}{2\lambda S^2} (\tau+1 - \tau) = \frac{q_n a}{\lambda S} = \frac{q_n}{c\rho S}$$

и

$$\tau'' = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{V_H} = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{q_n} c\rho S$$

для пластины.

Аналогично этому для цилиндра

$$\tau'' = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{V_H} = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{2q_n} c\rho R.$$

Отсюда длительность первого этапа нагрева для бесконечной пластины выразится выражением

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,3 \frac{S^2}{a} + \frac{c\rho S}{q_n} (t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}})$$

и для бесконечного цилиндра

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,25 \frac{R^2}{a} + \frac{c\rho R}{2q_n} (t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}).$$

Здесь температура поверхности изделия к концу первого этапа в соответствии с формулой (2.5) может быть определена по выражению

$$t''_{\text{пов}} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \frac{q_n}{C_{\text{пр}}}} - 273.$$

По достижении температурой поверхности изделия значения $t''_{\text{пов}}$ закончится первый этап, так как при этом температура печи достигнет заданного значения $T_{\text{печи}}$ и в дальнейшем благодаря работе терморегулятора остается неизменной, начнется второй этап нагрева при постоянной температуре печи. К этому моменту температура центра изделия станет равной $t''_{\text{центр}} = t''_{\text{пов}} - \Delta t$, а по его сечению установится параболическое (для плиты) распределение температуры. Расчет нагрева на втором этапе должен, очевидно, вестись с учетом этого распределения температуры в начальный период этапа. Это легко выполнить, если для этого момента в сечении изделия принять наличие некоторой средней температуры $t''_{\text{ср}}$. По расчетам Тайца [3], она может быть принята равной $t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,7\Delta t$ для бесконечной плиты и $t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,6\Delta t$ для бесконечного цилиндра. В этом случае расчет времени нагрева на втором этапе до заданной температуры t''' может быть осуществлен как для массивных изделий с использованием графиков Будрина, с тем лишь, однако, изменением, что относительные температуры будут

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{пов}}}{t_{\text{печи}} - t''_{\text{ср}}}$$

и

$$\Theta_{\text{центр}} = \frac{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{центр}}}{t_{\text{печи}} - t''_{\text{ср}}}.$$

Значения коэффициента теплоотдачи α , подставляемые в число Био, при расчете времени нагрева массивных изделий во втором этапе следует брать равными средним значениям из соответствующих коэффициентов для температур $t''_{\text{пов}}$ и $t'''_{\text{пов}}$. Если нагрев при постоянной температуре печи осуществляется от нуля (или близкой к нулю температуры), то значения α следует брать по рис. 2.6.

Расчет времени нагрева массивных тел иной формы: параллелепипеда, бесконечной призмы и конечного цилиндра затруднителен, так как требует построения кривых нагрева различных точек внутри

этих фигур. Поэтому лучше приводить реальные изделия либо к бесконечной плите, либо к бесконечному цилиндру.

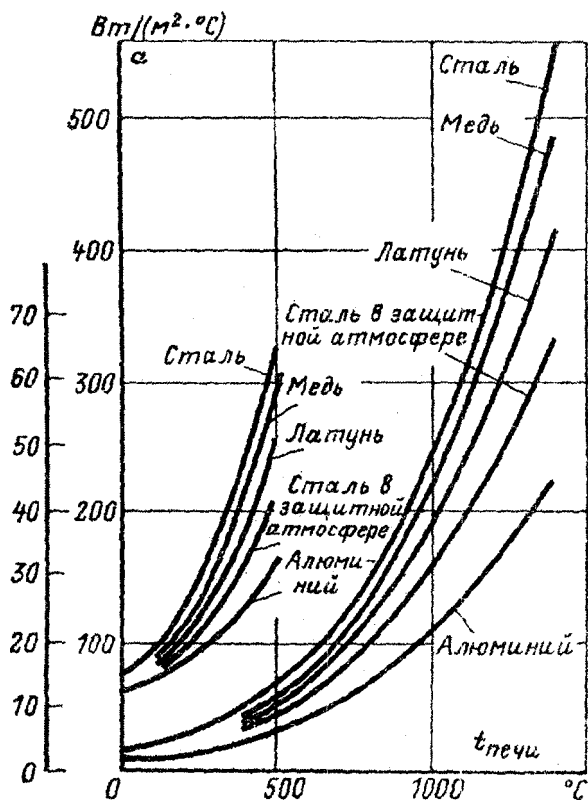


Рис. 2.6. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи в печи от ее температуры при нагреве от $0^\circ C$

Расчет времени нагрева насыпных немонолитных загрузок может быть осуществлен так же, как и монолитных, с учетом их насыпной плотности и эквивалентного коэффициента теплопроводности. Значения последнего для некоторых насыпных нагрузок даны в табл. 2.2.

**Эквивалентные коэффициенты теплопроводности
насыпных нагрузок**

Вид загрузки	Насыпная плотность	Коэффициент теплопроводности Вт/(м ² ·°С)
Стальные и мелкие болты и гайки $d = 12-25$ мм	1650–1800	4,65
Шарики стальные $d = 10-12$ мм	4400	6,98–10,5
Ролики стальные $d = 12-30$ мм	4350	8,14–11,6
Стальные тонкие кольца	1600	17,4–19,8
Стальные детали в металлической стружке	2000	0,81
То же	3000	1,51
Стальная проволока в бунтах	–	2,3–3,5
Стопы стальных листов толщиной 1 мм	–	0,47–0,58

Если задача периода выдержки заключается лишь в снижении внутреннего перепада температур до определенного минимума, то при нагреве массивных тел при $t_{\text{печи}} = \text{const}$ можно, задавшись этим допустимым внутренним перепадом, получить его в конце второго этапа нагрева. Следовательно, оба периода – нагрев и выдержка – в данном случае сливаются в один.

Пример. В электрической камерной печи мощностью 25 кВт производится нагрев шести стальных брусков, размером $700 \times 100 \times 100$ мм до 860 °С. Бруски укладываются в печь в один ряд, вплотную, нагрев – двусторонний, температура печи 900 °С, коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 34,9$ Вт/(м·°С). Удельная теплоемкость стали $c_{\text{ст}} = 0,67 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С), мощность холостого хода печи 5 кВт. Определить время нагрева загрузки.

Итак, имеем:

$$S = 0,05 \text{ м};$$

$$F_{\text{изд}} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,1 = 0,84 \text{ м}^2;$$

$$G_{\text{изд}} = 7,8 \cdot 0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 6 = 0,328 \text{ т} = 328 \text{ кг}.$$

Первый этап нагрева согласно формуле (2.1)

$$q_{\text{п}} = \frac{25 - 5}{0,84} \cdot 10^3 = 23800 \text{ Вт/м}^2.$$

Принимая ϵ стали равным 0,8, ϵ нагревателя и футеровки 0,9, отношение поверхности изделия $F_{\text{изд}}$ к внутренней поверхности камеры печи, участвующей в теплообмене, 1:3, определяем по формуле (2.3)

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 4,48.$$

По формуле (2.4) $C_{\text{пр}} = 5,76 \cdot 0,8 = 4,61$, разница 3 %.

По формуле (2.5)

$$t''_{\text{изд}} = 100^4 \sqrt[4]{\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \frac{23800}{4,48}} - 273 = 807 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, первый этап – нагрев изделий при постоянном удельном тепловом потоке – длится до 807 °С.

Определяем коэффициент теплоотдачи α для температур изделий 0 и 807 °С. В начальный момент нагрева температура печи согласно формуле (2.5) упадет до

$$t'_{\text{печи}} = 100^4 \sqrt[4]{\left(\frac{273}{100} \right)^4 + \frac{23800}{4,48}} - 273 = 583 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По формуле (2.7)

$$\alpha_{583-0} = 4,48 \frac{\left(\frac{583 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{273}{100} \right)^4}{583 - 0} = 40,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{900-807} = 4,48 \frac{\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{807 + 273}{100} \right)^4}{900 - 807} = 257 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 149 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Отсюда число Био

$$Bi = \frac{149}{34,9} \cdot 0,05 = 0,213 < 0,25 ,$$

следовательно, имеет место нагрев тонких изделий.

Время нагрева изделий до 807 °С при постоянном удельном тепловом потоке в 23 800 Вт/м² по формуле (2.6) будет

$$\tau_1 = \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3 \cdot (807 - 0)}{23\,800 \cdot 0,84 \cdot 3\,600} = 2,46 \text{ ч.}$$

Второй этап нагрева – от 807 до 860 °С, $t_{\text{печи}} = \text{const} = 900 \text{ °С}$.

Коэффициенты теплоотдачи при 807 и 860 °С:

$$\alpha_{900-807} = 257 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$\alpha_{900-860} = 275 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 266 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}),$$

отсюда

$$Bi = \frac{266 \cdot 0,05}{34,9} = 0,38 .$$

Это переходная область, в которой изделия можно считать практически тонкими.

Расчет времени нагрева ведем по формуле (2.9):

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3}{4,48 \cdot 0,84} \frac{100}{\left(\frac{1173}{100}\right)^3} \left[\Psi\left(\frac{860 + 273}{900 + 273}\right) - \Psi\left(\frac{(807 + 273)}{900 + 273}\right) \right] = \\ &= 3\,618 [\Psi(0,966) - \Psi(0,921)] = 3\,618(1,39 - 1,17) = \\ &= 3\,618 \cdot 0,22 = 796 \text{ с} = 0,221 \text{ ч;} \end{aligned}$$

здесь значения функции Ψ взяты из табл. 2.1.

Общее время нагрева

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 2,46 + 0,221 = 2,68 \text{ ч.}$$

Если бы аккумулирующая способность кладки печи была очень велика и температура печи оставалась бы неизменной с момента загрузки и равной 900°C , то время нагрева брусков сократилось бы до

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3}{4,48 \cdot 0,84 \cdot 3\,600} \frac{100}{(1,73)^3} \left[\Psi \left(\frac{860 + 273}{900 + 273} \right) - \Psi \left(\frac{807 + 273}{900 + 273} \right) \right] = \\ &= 1,01 [\Psi(0,966) - \Psi(0,233)] = 1,01(1,39 - 0,221) = 1,01 \cdot 1,17 = 1,18 \text{ ч.} \end{aligned}$$

По приближенной формуле (2.12), учитывая, что $\alpha_{\text{ср}} = 196 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, по рис. 2.6 получаем

$$\tau = \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3 (860 - 0)}{196 \cdot 0,3 \cdot 900 \cdot 3\,600 \cdot 0,84} = 1,18 \text{ ч} - \text{полное совпадение.}$$

Как видим, нагрев при постоянной температуре печи сокращает цикл нагрева с 2,7 до 1,2 ч, т. е. более чем в два раза. Объясняется это недостаточной мощностью печи, с самого начала обеспечивающей удельный тепловой поток в $23,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$, для того же чтобы обеспечить постоянство температуры печи, в первый момент нагрева понадобился бы удельный тепловой поток в $84,6 \text{ кВт}/\text{м}^2$, что потребовало бы поднятия полезной мощности печи до $84,6 \cdot 0,84 = 71 \text{ кВт}$. Однако эта мощность не могла бы быть использована, так как терморегулятор начал бы снижать мощность печи уже через несколько минут после начала нагрева.

Следует иметь в виду, что в первый этап нагрева температура камеры печи в действительности не упадет до 585°C благодаря накопленному в кладке теплу, которое в начале нагрева частично перейдет в изделия и тем самым обеспечит больший чем $23,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$ удельный тепловой поток. С другой стороны, при загрузке и выгрузке изделий печь обычно дополнительно охлаждается, снижая свою температуру $t'_{\text{печи}}$. Поэтому фактическое время нагрева брусков до 860°C будет весьма близким к расчетному 2,7 ч.

2.2. Определение основных размеров печного пространства и внешних габаритов печи

Определение основных внутренних размеров рабочего пространства электрической печи производят, исходя из штучной производительности, времени нагрева и коэффициента загрузки пода, также аналогично пламенным печам.

Внутренние размеры камеры печи должны быть такими, чтобы садка не только могла разместиться в ней рационально с точки зрения оптимальных условий для теплопередачи, но и чтобы ее можно было удобно загружать и вынимать из печи. Кроме того, внутренние размеры камеры печи и рабочих окон должны быть таковы, чтобы в ней мог поместиться рабочий, производящий ремонт. Эти требования относятся не только к маленьким печам, но и к печам со съемным или легко разбирающимся сводом.

Внешние габариты печи определяются ее внутренними размерами и толщиной кладки. Кладка должна обеспечить низкие температуры кожуха печи (не выше 60 °С при температуре окружающего воздуха в 20 °С) и, следовательно, малые тепловые потери печи. В табл. 2.3 приведены рекомендации по составу и толщине стенок электрических печей в зависимости от рабочей температуры.

Таблица 2.3

Температура печи, °С	Толщина слоя, мм	
	огнеупорного	теплоизоляционного
300–600	65	150–200
600–800	113	200–250
800–1000	113	250–300
1000–1200	113	300–350

Наиболее распространенным огнеупорным материалом в электропечестроении, и особенно в строительстве электрических печей сопротивления, является шамот с содержанием глинозема от 30 до 45 %. Так как эти печи работают в основном при температуре не выше 1300 °С, то огнеупорные и механические свойства шамота вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к этим печам. В электрических печах желательно применять шамотный кирпич первого сорта с содержанием не менее 38 % Al_2O_3 . Шамотные изделия по

своей огнеупорности делятся на три класса: класс А имеет огнеупорность не ниже 1730 °С, класс Б – не ниже 1670 °С, класс В – не ниже 1610 °С. Однако рабочая температура шамота намного ниже, так как он теряет свою механическую прочность при 1300–1400 °С, предельная рабочая температура шамота 1350–1450 °С. Шамот имеет сравнительно малый коэффициент расширения и хорошо выдерживает разные колебания температуры. Изделия из него имеют низкую электропроводность, что позволяет использовать шамот в электрических печах одновременно и как огнеупорный, и как электроизоляционный материал.

В электрических печах сопротивления диасовые изделия применяются редко, а магнезитовые, как правило, не применяются. В некоторых случаях в высокотемпературных печах сопротивления применяются карборундовые изделия для выполнения муфеля, жароупорных подовых плит и других элементов печи. Одним из наиболее распространенных теплоизоляционных материалов, используемых в электропечестроении, являются диатомит и трепек в виде кирпичей, плит, фасонных изделий и засыпки.

По данным рекомендациям составляют эскиз печи. Имея расчетный эскиз печи, составляют ее тепловой баланс, по которому вычисляют мощность печи.

2.3. Составление энергетического баланса и определение установочной мощности печи

Выделяющееся в нагревателях за время одного цикла тепло идет на нагрев изделий, вспомогательное тепло и покрытие тепловых потерь:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот.ср}} \tau_{\text{цикл}};$$

Полезное тепло, идущее на нагрев садки, в свою очередь определяется из

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{изд}} c_{\text{изд}} (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) = G_{\text{изд}} (i''_{\text{изд}} - i'_{\text{изд}}),$$

где $G_{\text{изд}}$ – масса садки;

$c_{\text{изд}}$ – средняя удельная теплоемкость садки в интервале температур $t'_{\text{изд}} - t''_{\text{изд}}$;

$t'_{\text{изд}}$ и $t''_{\text{изд}}$ – начальная и конечная температуры садки;

$i'_{\text{изд}}$ и $i''_{\text{изд}}$ – теплосодержания садки в начале и в конце нагрева.

Теплосодержание различных металлов дано в [3, табл. 4.1 и 4.2].

Вспомогательное тепло складывается из тепла, идущего на нагрев жароупорных поддонов, муфелей, корзин, ящиков и тому подобных деталей, нагреваемых вместе с садкой, а также из тепла, идущего на нагрев специальных газов, поступающих в печи для светлого отжига, цементационные и т.п.:

$$Q_{\text{всп}} = G_{\text{всп}} c_{\text{всп}} (t''_{\text{всп}} - t'_{\text{всп}}) + G_{\text{газ}} c_{\text{газ}} (t''_{\text{газ}} - t'_{\text{газ}}),$$

где $G_{\text{всп}}$ – масса поддонов или иных жароупорных деталей, нагреваемых в печи за цикл;

$c_{\text{всп}}$ и $c_{\text{газ}}$ – средние удельные теплоемкости жароупорных деталей и газа в соответствующем интервале температур;

$G_{\text{газ}}$ – масса защитного газа, водимого в печь за время одного цикла;

$t'_{\text{всп}}$, $t'_{\text{газ}}$, $t''_{\text{всп}}$, $t''_{\text{газ}}$ – температуры жароупорных деталей и газа в начальном и нагретом состояниях.

Тепловые потери печи за время одного цикла складываются из тепловых потерь за отдельные его периоды, т.е. из потерь за время нагрева, время выдержки, время остывания и время простоя печи при загрузке и выгрузке:

$$q_{\text{пот.ср}} \tau_{\text{цикл}} = q_{\text{пот.нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{пот.выд}} \tau_{\text{выд}} + q_{\text{пот.ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{пот.пр}} \tau_{\text{пр}}.$$

Определение тепловых потерь печи производится для установившегося режима работы аналогично пламенным печам. При этом тепловые потери через футеровку определяются по формулам теплопередачи через сложную стенку при граничных условиях третьего рода. При этом если стенка состоит из ряда параллельных слоев с разными коэффициентами теплопроводности, то складывать надо не тепловые сопротивления этих слоев, а их тепловые проводимости. Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцы, причем учитывается время открытого состояния последней:

$$q_{\text{пот.дв}} = q_{\text{пот.откр.дв}} \frac{\tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}} + q_{\text{пот.закр.дв}} \frac{\tau_{\text{цикл}} - \tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}},$$

где $q_{\text{пот.откр.дв}}$ и $q_{\text{пот.закр.дв}}$ – тепловые потери через открытую и закрытую дверцы печи.

Тепловые потери через закрытую дверцу определяются так же, как и тепловые потери через любую стенку, тепловые потери через открытую дверцу определяются излучением и конвекцией. Потери на излучение рассчитываются по закону Стефана–Больцмана, причем можно принять, что малые отверстия излучают как абсолютно черные тела ($\epsilon = 1,0$), а крупные отверстия, приближающиеся по своим размерам к внутренним габаритам печной камеры, – со степенью черноты $\epsilon = 0,8$:

$$q_{\text{изл.отв}} = \epsilon \cdot 5,76 \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F_{\text{отв}} \psi, \text{ Вт},$$

где $T_{\text{печи}}$ – абсолютная температура рабочей камеры печи;

T_0 – абсолютная температура окружающего печь воздуха;

$F_{\text{отв}}$ – площадь окна дверцы;

ψ – коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину отверстия и экранирующее действие его стен. Значения коэффициента диафрагмирования могут быть взяты из рис. 2.7 либо рассчитаны по формулам, приведенным в [3].

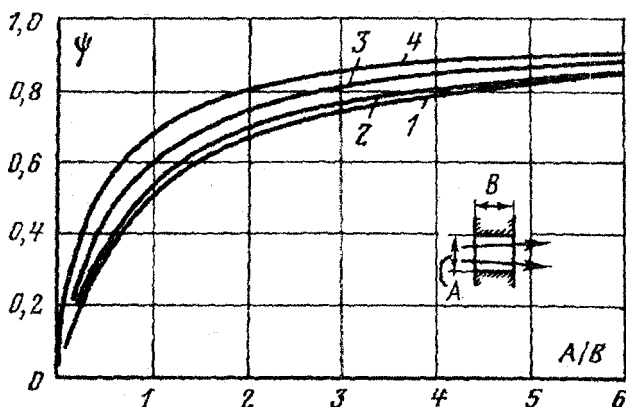


Рис. 2.7. Коэффициент диафрагмирования отверстий:

1 – круглое отверстие; 2 – квадратное; 3 – прямоугольное (соотношение сторон 2:1);
4 – длинная щель высотой A

Потери через тепловые короткие замыкания следует подсчитывать оценивая температуру на обоих концах металлического стержня (t_1 и t_2), проходящего через стену:

$$q_{\text{пот.к.з}} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{L_{\text{стр}}} F_{\text{стр}},$$

где $L_{\text{стр}}$ — длина стержня;

$F_{\text{стр}}$ — его сечение.

Эти потери могут быть приняты равными 50–150 % от потерь тепла через стенки печи.

В печах, которые работают непрерывно и в которых не производится остывание изделий, средние значения температур камеры печи мало отличаются от рабочей температуры, для них тепловые потери периодов нагрева, выдержки и простоев можно считать одинаковыми и равными тепловым потерям при рабочей температуре печи.

Расход энергии на единицу обрабатываемой в печи продукции может быть определен из выражения

$$A = \frac{Q_{\text{цикл}}}{E \tau_{\text{цикл}}},$$

где E — производительность печи.

Тепловой КПД печи

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот}} \tau_{\text{цикл}}}.$$

Количество тепла, которое необходимо ввести в печь за период нагрева изделий, должно быть достаточным, чтобы нагреть садку и жароупорные детали, а также чтобы компенсировать тепловые потери печи за время остывания в ней изделий и ее простоя:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот.нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{пот.ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{пот.пр}} \tau_{\text{пр}}.$$

Мощность печи периодического действия

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}$$

или

$$P_{\text{печи}} = K(P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{пот}}) = \\ = K \frac{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот.нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{пот.ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{пот.пр}} \tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{нагр}}}, \quad (2.13)$$

здесь $K = 1,2-1,5$ – коэффициент запаса, который вводится для того, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу изделиям на первом этапе нагрева изделий (при $q_n = \text{const}$); кроме того, им предусматриваются возможное ухудшение тепловой изоляции печи в эксплуатации, старение нагревателей, возможное снижение напряжения в цехе против номинального на 5–10 % и другие местные обстоятельства, учесть которые при проектировании невозможно. Для непрерывно работающих печей $K = 1,2-1,3$, для камерных печей $K = 1,3-1,5$.

Найденное значение мощности следует проверить, разделив его на величину внутренней поверхности стенок, на которых предполагается установка нагревателей. Если полученная величина удельной мощности превышает 30–35 кВт/м², то для нагревателей нужны дополнительные поверхности стенок. Кроме того, мощность, приходящаяся на 1 м² полной внутренней поверхности печи, должна быть не менее 15 кВт для возможности быстрого разогрева холодной печи до рабочих температур.

Следует иметь в виду, что раздельное определение $P_{\text{пол}}$, $P_{\text{всп}}$ возможно лишь тогда, когда нагрев изделий и вспомогательных деталей не связан (например, крючки, на которых подвешены изделия, газовая атмосфера печи). Если же тепловые потоки, идущие на нагрев изделий и вспомогательных деталей, сливаются (изделия лежат на поддонах, часть тепла проходит в изделия через поддоны), то время нагрева должно определяться для изделия плюс вспомогательная деталь, полезный и вспомогательный тепловые потоки будут для них общими, так же как и поверхность, воспринимающая тепло $F_{\text{изд}}$; в этом случае

$$P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} = q_n F_{\text{изд}}$$

Особое место занимает нагрев изделий в таре или муфеле. В этих условиях определение времени нагрева расчетным путем затруднительно, и оно обычно задается на основе опытных данных, а мощность печи определяется по формуле (2.13).

Когда температурный перепад Δt в изделиях в период нагрева ограничен технологическим заданием или задана максимальная скорость нагрева изделий V_n , то принятые значения идеального теплового потока q_n должны быть проверены по выражениям:

для пластины

$$q_n \leq \Delta t \frac{2\lambda}{S} \quad \text{или} \quad q_n \leq V_n c_p S;$$

для цилиндра

$$q_n \leq \Delta t \frac{2\lambda}{R} \quad \text{или} \quad q_n \leq 0,5V_n c_p R.$$

2.4. Материалы для нагревательных элементов электрических печей сопротивления

Нагревательные элементы, так же как и жароупорные материалы, работают в зоне высоких температур, и кроме этого к ним предъявляются особые требования к электрическим свойствам, а именно:

1. **Ж а р о с т о й к о с т ь** – неокисляемость под действием кислорода воздуха в условиях высоких температур.

2. **Д о с т а т о ч н а я ж а р о п р о ч н о с т ь** – механическая прочность при высоких температурах. Материалы для нагревательных элементов не являются конструкционными, поэтому их механическая прочность может быть сравнительно невелика; достаточно, чтобы изготовленные из них нагреватели были в состоянии удерживать свой вес, давая при этом малые деформации.

3. **Б о л ь ш о е у д е л ь н о е э л е к т р и ч е с к о е с о п р о т и в л е н и е**. Нагревательные элементы в печах сопротивления в большинстве случаев включаются непосредственно в питающую сеть без промежуточного трансформатора, и поэтому при данной мощности нагревателя его сопротивление при рабочей температуре

также должно быть вполне определенным. Чем меньше удельное электрическое сопротивление материала нагревателя, тем больше длина выполненного из него нагревателя и тем меньше должно быть его поперечное сечение. Такой тонкий и длинный нагреватель конструктивно неудобен, его трудно размесить в печи, и его срок службы невелик. Поэтому желательно, чтобы металлические материалы для нагревателей имели возможно большее удельное электрическое сопротивление.

4. Малый температурный коэффициент сопротивления. Чем больше этот коэффициент, тем больше разница в электрическом сопротивлении горячего и холодного нагревателя. Почти все материалы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления, и с увеличением температуры их удельное сопротивление возрастает. Поэтому мощность и забираемый из сети ток различны в холодном и разогретом состоянии, а так как в рабочем состоянии печь разогрета, то именно к этому состоянию и должна быть отнесена ее номинальная мощность. При первоначальном включении (после остывания) печь с такими нагревателями берет из сети повышенную мощность до тех пор, пока нагреватели разогреются. Так как для чистых металлов температурный коэффициент сопротивления около 0,4 % на каждый градус, то это дает четырехкратное увеличение сопротивления нагревателя при нагреве до 1000 °С по сравнению с холодным состоянием и, следовательно, пусковой толчок тока печи при ее включении будет иметь четырехкратное значение по сравнению с номинальным током. Поэтому необходимо, чтобы материал для нагревательных элементов имел возможно меньший температурный коэффициент сопротивления, и именно поэтому большинство этих материалов представляют собой сплавы, а не чистые металлы, так как сплавы имеют меньший температурный электрический коэффициент по сравнению с чистыми металлами. Если же нагреватели изготавливаются из чистых металлов (например, платина, молибден), то приходится прибегать к питанию печи на время ее разогрева пониженным напряжением.

5. Постоянство электрических свойств. Некоторые материалы с течением времени в работе меняют свои электрические свойства: они стареют, их удельное сопротивление увеличивается, а следовательно, мощность печи, забираемая ею из сети, падает. Если такое старение достигает заметной величины, то для

его компенсации каждую печь приходится снабжать регулировочным трансформатором, с тем чтобы повышать проводимое к печи напряжение одновременно с ростом сопротивления нагревателя.

6. **Постоянство размеров.** Некоторые материалы подвержены ползучести и с течением времени сильно растут, т.е. выполненные из них нагреватели удлиняются. Это приводит к конструктивным неудобствам и необходимости при конструировании нагревателя предусматривать возможность его удлинения иногда до 30–40 %.

7. **Обработки в емкости.** Металлические материалы для нагревателей должны давать возможность изготавливать из них ленты и проволоку различных сечений, навивать из них спирали, сваривать нагреватели между собой и приваривать к ним выводы.

Материалы для нагревательных элементов выполняются в виде ленты, проволоки и стержней. Кроме того, иногда нагреватели выполняются литыми или штампованными.

Основными материалами для нагревательных элементов, удовлетворяющими вышеуказанным требованиям, являются сплавы никеля, хрома и железа, которые называются «нихромы». Эти сплавы можно подразделить на две основные группы – двойные и тройные сплавы.

Первая группа объединяет сплавы, состоящие из никеля и хрома, содержание железа в их невелико (0,5–3,0 %), чем и объясняется их название. Вторая группа охватывает собой сплавы, помимо никеля и хрома содержащие также и железо.

Нихром является весьма жаростойким материалом, так как он обладает чрезвычайно прочной защитной пленкой из окиси хрома Cr_2O_3 с температурой плавления, большей, чем у сплава, и хорошо выдерживающей периодические нагревы и остывания. Кроме того, он обладает хорошими механическими свойствами как при нормальной, так и при высокой температурах и достаточной пластичностью, так что он легко обрабатывается и, в частности, хорошо сваривается. Электрические свойства нихрома также вполне удовлетворительны, он обладает высоким удельным сопротивлением, малым температурным коэффициентом сопротивления, у него отсутствуют явления старения и роста.

Чем больше содержание хрома в сплаве, тем больше в его защитной пленке содержание Cr_2O_3 , тем она более тугоплавка и тем лучше материал противостоит окислению. Но с увеличением содержания хрома одновременно ухудшается обрабатываемость материала, и при

достижении 30 % содержания хрома волочение и холодная прокатка становятся уже невозможными. Поэтому, как правило, содержание хрома в них не превосходит 20 %. Двойные сплавы (X20H80, X20H80T) могут работать в печах с рабочей температурой до 1100 °С.

Добавление железа в сплав не только улучшает его обрабатываемость и увеличивает удельное сопротивление, но и ухудшает его температурный коэффициент сопротивления и значительно снижает жаростойкость. Тем не менее в тех случаях, когда рабочая температура не превосходит 1000 °С, допустимо пользоваться тройным сплавом, так как он дешевле и содержит меньше дефицитного никеля.

Все нихромы являются немагнитными сплавами.

Дороговизна и дефицитность нихрома привели к интенсивным поискам других сплавов, более дешевых и способных заменить его в тех или иных условиях. Такого рода сплавами являются железо-хромоалюминевые сплавы.

Благодаря высокому содержанию хрома и алюминия они могут быть даже более жаростойкими по сравнению с нихромами и работать при температурах до 1300 °С и даже до 1350 °С. Однако эти сплавы чрезвычайно хрупкие и непрочные, особенно после нескольких нагревов в печи. Большим недостатком этих сплавов является их чувствительность при высоких температурах к окислам железа и кремнезему, которые разрушают образующуюся на них защитную пленку из окислов алюминия и хрома, а также увеличение длины нагревателя (до 30–40 %). Поэтому при конструировании нагревателей из этих сплавов необходимо предусмотреть возможность их свободного удлинения и надежного крепления отдельных витков или зигзагов во избежание их замыкания при короблении.

В настоящее время широко используются два сплава: ОХ23Ю5А (ЭИ-595) с рабочей температурой 1200 °С и ОХ27Ю5А (ЭИ-626) с рабочей температурой 1300 °С. Это высокохромистые сплавы, модифицированные небольшими количествами щелочных металлов (цезий и барий). До температур 1000–1100 °С они сохраняют достаточную прочность. Однако повышенная хрупкость после нагрева, склонность к росту и короблению, а также к ползучести у них сохраняется.

Из неметаллических нагревателей наибольшее распространение получили силит и глобар. Эти нагреватели представляют собой карборундовые стержни диаметром от 8 до 30 мм и длиной актив-

ной части до 560 мм. Карборунд хорошо выдерживает 1400 °С и, следовательно, может обеспечить работу электрических печей до 1350–1400 °С.

Силиконовые и глобаровые стержни в нагретом состоянии хрупкие и малопрочные и требуют осторожного обращения. Они чувствительны к быстрому нагреву, вследствие чего разогрев печи следует производить постепенно.

Карборундовые нагреватели очень чувствительны к окружающей их атмосфере. В полностью инертной атмосфере (аргон, гелий) они могут выдерживать температуру до 1650 °С, в воздушной атмосфере и в углекислом газе – до 1400 °С, в атмосфере с окисью углерода или с водородом – до 1300 °С, в вакууме с давлением 13 Па – 1200 °С. В эксплуатации сопротивление стержней увеличивается в несколько раз, обычно допускают четырехкратный расчет, и это приводит к необходимости иметь регулировочные трансформаторы с пределом регулирования $(0,3-0,2)U_{ном}$.

Высокотемпературные нагреватели выполняют также на основе дисилицида молибдена ($MoSi_2$) методом порошковой металлургии. Они имеют низкое удельное сопротивление $3 \cdot 10^3$ Ом·м (поэтому эти нагреватели выполняются тонкими – диаметром 6 мм) и высокий электрический температурный коэффициент. Так как они не очень прочные, то их обычно выполняют U-образными, в виде шпилек и устанавливают в печи вертикально, что позволяет им свободно расширяться.

Наибольшее распространение в высокотемпературных печах получили молибденовые нагреватели, выполняемые в виде проволоки, намотанной на огнеупорную керамическую трубу, либо в виде кружков или листа. Молибден интенсивно распыляется в вакууме при высоких температурах, поэтому в вакуумных печах его рабочая температура не превышает 1650–1700 °С, в защитной среде его максимальная рабочая температура достигает 2200 °С. Еще более высокие температуры (до 3000 °С) можно получить в печах с вольфрамовыми нагревателями.

Основные характеристики материалов для нагревательных элементов электрических печей сопротивления приведены в табл. 2.4.

Основные характеристики материалов для нагревательных элементов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование материала, марка, химический состав	Плотность при 0 °С ρ_m , кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление ρ , 10 ⁻⁶ Ом·м	Коэффициент линейного расширения в интервале 20- $t_{\text{макс}}$ °С, 10 ⁻⁶ 1/°С	Удельная теплоемкость c , 10 ³ Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	Температура плавления $t_{\text{пл}}$, °С	Максимальная рабочая температура $t_{\text{макс}}$, °С	Технологические и эксплуатационные свойства	Область применения
Сортовая сталь (прокат)	7860	(0,12-0,15)+ (7-10)·10 ⁻³	11,7	0,481	45-55	1530	400-500 (1000 °С в водороде)	Непостоянство электрических свойств, высокий температурный коэффициент, переменные магнитные свойства, отсюда невозможность расчета свойств, корродирует	Низкотемпературные нагреватели (в отдельных случаях) при крупных сечениях. Прутки, полосы, трубы
Фехраль Х13Ю4 (ЭИ-60) Ст 12-15 А1 3,5-5,5; Fe - ос- тальное	7400	1,26 (20 °С); 1,28 (200 °С); 1,32 (400 °С); 1,42 (800 °С)	-	-	-	1450	800	Сталь магнитная, ферритного класса, окислительная, не жаропрочная, корродирует, пластичность и свариваемость удовлетворительные	Низкотемпературные печи до 500 °С и бытовые нагревательные приборы, может работать в сернистой атмосфере. Проволока и лента

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X25H20 (ЭЛ-74) Cr 20-24, Ni 17-20	7880	0,92 (20 °C); 1,08 (400 °C); 1,12 (600 °C); 1,3 (800 °C)	15,4	0,502	16,0	1400- 1430	1000	Сталь немагнитная, аустенитного класса, окалиностойкая, жаро- прочная, пластичность высокая, свариваемость хорошая	Среднетемпературные печи до 900 °C, воздух, вакуум, защитные среды, разъедается в сернистой атмосфере. Проволока
Тройной нихром X15H60 (ЭХН60) Cr 13-18, Ni 55-61	8200	1,11 (20 °C); 1,18 (400 °C); 1,2 (600 °C); 1,21 (800 °C); 1,23 (1000 °C)	16,3	0,461	16,0	1370- 1410	1000	То же	Среднетемпературные печи до 900 °C, воздух, вакуум, защитные среды, разъедается в сернистой атмосфере. Проволока и лента
Двойной нихром X20H80 (ЭХН80) Cr 20-23, Ni 75-78	8400	1,09 (20 °C); 1,13 (600 °C); 1,11 (800 °C); 1,12 (1000 °C)	16,5	0,440	14,2	1390- 1420	1100	То же	Среднетемпературные печи до 1050 °C, воздух, вакуум, защитные среды, разъедается в сернистой атмосфере. Проволока и лента
XН70Ю (ЭИ-652) Cr 26-29; Al 2,6-3,5; Ni - остальное, сплав модифицир.	7900	1,34 (20 °C); 1,42 (400 °C); 1,4 (600 °C); 1,4 (800 °C); 1,45 (1000 °C)	13,1	-	13,5	1390- 1420	1200	Сталь немагнитная, высокая окалиностойкость в воздушной среде, жаропрочная, пластичность и свариваемость удовлетворительные	Среднетемпературные печи до 1100 °C, воздух, вакуум, защитные среды, разъедается в сернистой атмосфере. Проволока и лента

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОХ23Ю5А (ЭИ-595) Cr 21,5-23,5; Al 4,5-5,2; сплав модифицир.	7270	1,35 (20 °C); 1,42 (600 °C); 1,45 (800 °C); 1,46 (1200 °C);	17,4	-	19,5	1500- 1510	1200	Сталь магнитная, ферритная, корродирует, окалиностойкая, нежаропрочная, пластичность и свариваемость удовлетворительные	Среднетемпературные печи до 1150 °C, воздух, вакуум не выше 10 Па, сернистые среды. Проволока и лента
ОХ27Ю5А (ЭИ-626) Cr 26,0-28,0; Al 5,0-5,8; сплав модифицир.	7190	1,42 (20 °C); 1,46 (600 °C); 1,48 (1000 °C); 1,48 (1200 °C)	15,0	-	19,5	1500- 1510	1300	То же	Среднетемпературные печи до 1250 °C, воздух, вакуум не выше 10 Па, сернистые среды. Проволока и лента
Кантал DSI DSD A A-1 Cr-22; Al-4,5-5,5; Co-0,5; Fe - все остальное	7250 7250 7150 7100	1,35 (20 °C); 1,45 (1100 °C); 1,35 (20 °C); 1,45 (1100 °C); 1,39 (20 °C); 1,47 (1100 °C); 1,45 (20 °C); 1,5 (1200 °C)	14-15	0,461	16,3	1510	1150 1280 1330 1375	Сплав магнитный, ферритного класса, окалиностойкий, нежаропрочный, пластичность и свариваемость удовлетворительные	Среднетемпературные печи до 1100-1300 °C, воздух, вакуум, защитные атмосферы. Проволока, лента, трубчатые нагреватели

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дисилид молибдена MoSi_2	5600	0,3 (20 °C); 1,3 (600 °C); 2,2 (1000 °C); 3,0 (1300 °C); 3,65 (1600 °C)	—	—	—	—	1700	Материал окалино-стойкий, непрочный, хрупкий, сваривается в вакууме	Высокотемпературные печи до 1600 °C, в воздухе, при давлении ниже 1300 Па максимальная рабочая температура резко падает. Разъедаются сернистой атмосферой
«Кантал супер» ST и N-33 MoSi_2	5600	0,25 (20 °C); 1,25 (600 °C); 2,2 (1000 °C); 2,9 (1300 °C); 3,95 (1700 °C)	—	—	—	—	1700 1800	То же	Высокотемпературные печи до 1600 и 1700 °C, в воздухе, при давлении ниже 1300 Па максимальная рабочая температура резко падает. Разъедаются сернистой атмосферой
Карбундовые нагреватели SiC	2200– 2300	809–1900	5–6	0,711	—	—	1450	Материал хрупкий, в виде стержней	Высокотемпературные печи до 1400 °C, в воздухе. Стержни, трубки

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Молибден Mo	10200	0,05 (20 °C); 0,26 (800 °C); 0,38 (1200 °C); 0,5 (1600 °C); 0,62 (2000 °C); 0,68 (2200 °C)	5,2	0,251	141	2610	2200 (в защитной атмосфере) 1700 (в вакууме)	В холодном состоянии хрупкий, поддается деформации при 500–600 °C. Интенсивно окисляется на воздухе и в парах воды	Высокотемпературные печи до 2000 °C (водород) и до 1650 °C (вакуум). Проволока, прутки, лист
Вольфрам W	19340	0,055 (20 °C); 0,27 (800 °C); 0,525 (1600 °C); 0,805 (2400 °C); 1,02 (3000 °C)	4,1	0,134	163	3380	3000	В холодном состоянии хрупкий, поддается деформации при 600–700 °C. Интенсивно окисляется на воздухе	Высокотемпературные печи до 3000 °C. Проволока, прутки, лист, штабики
Ниобий Nb	8570	0,17 (20 °C); 0,48 (800 °C); 0,72 (1600 °C); 0,89 (2200 °C)	7,1	0,268	60,5	2468	2100	Пластичен при комнатной температуре. Интенсивно окисляется на воздухе	Высокотемпературные печи до 2000 °C. Проволока, прутки, лист
Тантал Ta	16600	0,13 (20 °C); 0,49 (800 °C); 0,75 (1600 °C); 1,0 (2400 °C)	6,5	0,138	54,7	2996	2500	То же	Высокотемпературные печи до 2300 °C. Проволока, прутки, лист
Графит C	1500– 1700	8–13	4,8	0,670	125– 175	3600	3000	Обрабатывается, интенсивно окисляется на воздухе при температуре свыше 500 °C	Высокотемпературные печи до 2500 °C
Уголь C	1400– 1600	40–60	–	–	25–60	–	2700	Обрабатывается, интенсивно окисляется на воздухе при температуре свыше 400 °C	Высокотемпературные печи до 2000 °C

2.5. Расчет нагревательных элементов электрических печей сопротивления

С точки зрения обеспечения надежности работы электрических промышленных печей сопротивления и с точки зрения экономии потребляемых ими дорогих дефицитных материалов и электроэнергии существенное значение имеет правильность расчета нагревательных элементов.

При расчете нагревателей электрических печей сопротивления конструктор должен выбрать тип нагревателей и материал для их изготовления, определить их размеры – сечение и длину – и разместить нагреватели внутри печи. Для решения этих задач следует учитывать, что:

1. Мощность, выделяющаяся в нагревательных элементах, должна быть равна расчетной мощности печи, следовательно, сопротивление этих элементов должно соответствовать этой мощности и напряжению питания, что дает возможность связать мощность печи с размерами и материалом нагревателей.

2. Вся забираемая электрической печью из сети мощность выделяется в ее нагревательных элементах в виде тепла и при установившемся тепловом режиме (а он в них устанавливается весьма быстро) должна быть передана нагреваемым изделиям и кладке печи. Уравнения теплопередачи между нагревателями, нагреваемыми изделиями и футеровкой печи позволяют вторично установить связь между их температурами, мощностью печи и размерами нагревательного элемента.

3. Нагреватели должны быть размещены внутри рабочего пространства печи (только на боковых стенках, только в поду и на своде или на всех стенках камеры). Это требование также накладывает известные условия на размеры (особенно длину) и конструкцию нагревательных элементов.

При выборе возможных материалов для изготовления нагревателей следует учитывать, что работа материала в нагревательных элементах электрической печи сопротивления может быть охарактеризована двумя видами температуры – рекомендуемой рабочей и максимально допустимой температурой.

Максимально допустимая температура материала соответствует той температурной границе, за которой начинается его интенсивное

окисление или распыление. Рекомендуемая температура лежит ниже максимально допустимой, и ее можно использовать в качестве расчетной температуры.

В табл. 2.5 приведены рекомендуемые и максимально допустимые температуры наиболее часто применяемых материалов для нагревательных элементов в соответствии с режимом работы печи (непрерывный, прерывистый).

Таблица 2.5

Рекомендуемая и максимально допустимая температуры нагревателей

Наименование материала нагревателя	Рекомендуемая температура, °С		Максимально допустимая температура, °С	
	Непрерывный режим	Прерывистый режим	Непрерывный режим	Прерывистый режим
X20H80 и X20H80T	1050	1000	1150	1100
X15H60	950	900	1050	1000
X25H20, X23H18 (ЭИ-417)	850	800	1000	950
X13Ю4 (фехраль)	750	650	900	800
OX23Ю5А (ЭИ-595)	1050	1000	1200	1150
OX27Ю5А (ЭИ-626)	1150	1100	1300	1250
Карборундовые нагреватели	1350	1300	1450	1400
Нагреватели из дислицида молибдена	1550	1500	1700	1650

Примечание. Данные табл. 2.5 относятся к металлическим нагревателям с диаметром проволоки 4 мм или толщиной ленты 2 мм. При увеличении сечения нагревателей (проволока 7–10 мм, лента шириной 3 мм) приведенные в табл. 2.5 значения рекомендуемых и максимально допустимых температур могут быть увеличены на 50 °С. При малых сечениях (диаметре проволоки 1,0 мм, толщине ленты 0,5 мм) эти значения должны быть снижены на 50 °С (например, в бытовых электронагревательных приборах).

Под непрерывным режимом подразумевается круглосуточная непрерывная работа (методические печи), под прерывистым – включение и отключение печи несколько раз в сутки с существенным ее остыванием.

2.5.1. Расчет металлических нагревателей

Предварительно следует выбрать схему включения, число фаз и параллельных ветвей нагревателей печи, а это дает возможность задаться мощностью и напряжением нагревателя.

Если мощность печи будет до 15 кВт, то схема включения – однофазное соединение, свыше 15 кВт – трехфазное (треугольник или звезда).

Тогда мощность, приходящаяся на один нагревательный элемент:

$$P_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{печи}}}{n \cdot m}, \text{ кВт},$$

где n – количество фаз;

m – количество параллельных ветвей нагревателей.

Для определения размеров – сечения и длины нагревателя – выведем связь между параметрами питающей сети, характеристиками нагревателя, его размерами и удельной поверхностной мощностью.

С учетом соблюдения принятых условий можно записать

$$P_{\text{эл}} = \frac{U^2}{10^3 R}; \quad R = \frac{U^2}{10^3 P_{\text{эл}}} = \rho \frac{L \cdot 10^6}{q} \quad (1\text{-е условие});$$

$$P_{\text{эл}} = WF \cdot 10^3; \quad W = \frac{10^3 P_{\text{эл}}}{F} = \frac{10^3 P_{\text{эл}}}{10 \text{ ПЛ}} = \frac{10^2 P_{\text{эл}}}{\text{ПЛ}} \quad (2\text{-е условие}).$$

где $P_{\text{эл}}$ – мощность печи или зоны, кВт (мощность одной параллельной ветви, если в печи несколько параллельных ветвей, и мощность одной фазы, если печь трехфазная);

U – напряжение питающей сети, В (для трехфазной печи – фазовое, если нагреватели включены в звезду, и линейное, если нагреватели включены в треугольник);

R – сопротивление нагревателя, Ом (одной параллельной ветви и одной фазы);

ρ – удельное сопротивление материала нагревателя, отнесенное к его рабочей температуре, Ом·м;

L – длина нагревателя, м (одной параллельной ветви и одной фазы);
 q – сечение нагревателя, мм²;
 Π – периметр нагревателя, мм;
 F – полная поверхность нагревателя, см²;
 W – удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/см².
 Определяем длину нагревателя L и тем самым исключаем ее:

$$L = \frac{U^2 q}{\rho \cdot 10^6 P_{\text{эл}} \cdot 10^3} = \frac{10^2 P_{\text{эл}}}{\Pi W},$$

откуда

$$\Pi q = \frac{\rho P_{\text{эл}}^2 10^{11}}{U^2 W}. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) дает нам искомую связь между размерами нагревателя, его удельным сопротивлением, мощностью печи, удельной поверхностной мощностью и напряжением питающей сети.

Для круглого материала (проволока, стержни)

$$\Pi = \pi d \quad \text{и} \quad q = \pi d^2 / 4,$$

следовательно,

$$\frac{\pi^2 d^3}{4} = \frac{\rho \cdot P_{\text{эл}}^2 \cdot 10^{11}}{U^2 W} \quad \text{и} \quad d = \sqrt[3]{\frac{4\rho \cdot P_{\text{эл}}^2 \cdot 10^{11}}{\pi^2 U^2 W}}, \quad (2.15)$$

где d – диаметр круглого нагревателя, мм.

Для прямоугольного материала (лента), задаваясь отношением ее сторон $b/a = m$ (иначе задача будет неопределенной), имеем

$$\Pi = 2(b + a) = 2(ma + a) = 2a(m + 1);$$

$$q = ba = ma^2,$$

где a, b – стороны прямоугольного ленточного нагревателя, мм.

$$2m(m+1)a^3 = \frac{\rho \cdot P_{эл}^2 \cdot 10^{11}}{U^2 W};$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot P_{эл}^2 \cdot 10^{11}}{2m(m+1)U^2 W}}. \quad (2.16)$$

Длина и масса нагревателя для проволочного или стержневого нагревателя

$$L = \frac{Rq}{\rho \cdot 10^6} = \sqrt[3]{\frac{P_{эл} U^2}{4\pi \rho W^2 \cdot 10^5}} \quad \text{или} \quad L = 0,796 \frac{Rd^2}{\rho}; \quad (2.17)$$

$$G = \rho_M Lq \cdot 10^{-6} = \rho_M \sqrt[3]{\frac{\rho P_{эл}^5}{160\pi^2 U^2 W^4}};$$

для ленточного нагревателя соответственно

$$L = \frac{Rq}{10^6 \rho} = \sqrt[3]{\frac{P_{эл} U^2 m}{4(m+1)^2 \rho W^2 \cdot 10^5}} \quad \text{или} \quad L = 0,94 \frac{Rab}{\rho}; \quad (2.18)$$

$$G = \rho_M Lq \cdot 10^{-6} = \rho_M \sqrt[3]{\frac{m^2 \rho P_{эл}^5}{160(m+1)^4 U^2 W^4}},$$

где ρ_M – плотность материала нагревателя, кг/м³;

$m = b/a = (8-12)$ – отношение ширины ленты нагревателя к ее толщине.

При расчете размеров нагревателей по формулам (2.15)–(2.18) необходимо предварительно определить удельную поверхностную мощность нагревателя W , представляющую собой отношение мощности нагревателя $P_{эл}$ к полной его поверхности F , т.е.

$$W = P_{эл} / F_{нагр}.$$

В действительности не вся поверхность нагревателя равномерно излучает тепло в печь и на нагреваемый металл. В зависимости от конструкции и расположения нагревателей часть излучения попадает на футеровку печи, на другие поверхности этого же нагревателя, кроме того, реальный нагреватель покрывает не только полезное тепло, но и тепловые потери печи, поэтому его поверхность должна отличаться от поверхности эквивалентного ему идеального нагревателя. Таким образом, можно условно считать, что всякий нагреватель излучает тепло не своей полной поверхностью, а некоторой условной «активной» поверхностью, следовательно, можно записать

$$P_{\text{пол}} = W_{\text{ид}} \cdot F_{\text{факт}} = WF_{\text{нагр}}(1 - \gamma),$$

откуда

$$W = W_{\text{ид}} \cdot \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{акт}}(1 - \gamma)} = W_{\text{ид}} \psi,$$

где γ – расчетный коэффициент тепловых потерь;

ψ – коэффициент, представляющий отношение $W/W_{\text{ид}}$.

Полученная связь между удельными поверхностными мощностями реального и идеального нагревателей позволяет для расчета реальных печей использовать графики идеальных поверхностных мощностей идеального нагревателя (рис. 2.8 – 2.12).

Рекомендуемые отношения $W/W_{\text{ид}}$ при нагреве различных материалов для наиболее употребляемых систем нагревателей при минимальных (из конструктивных соображений) относительных витковых расстояниях и $\gamma = 0,25$ приведены в табл. 2.6.

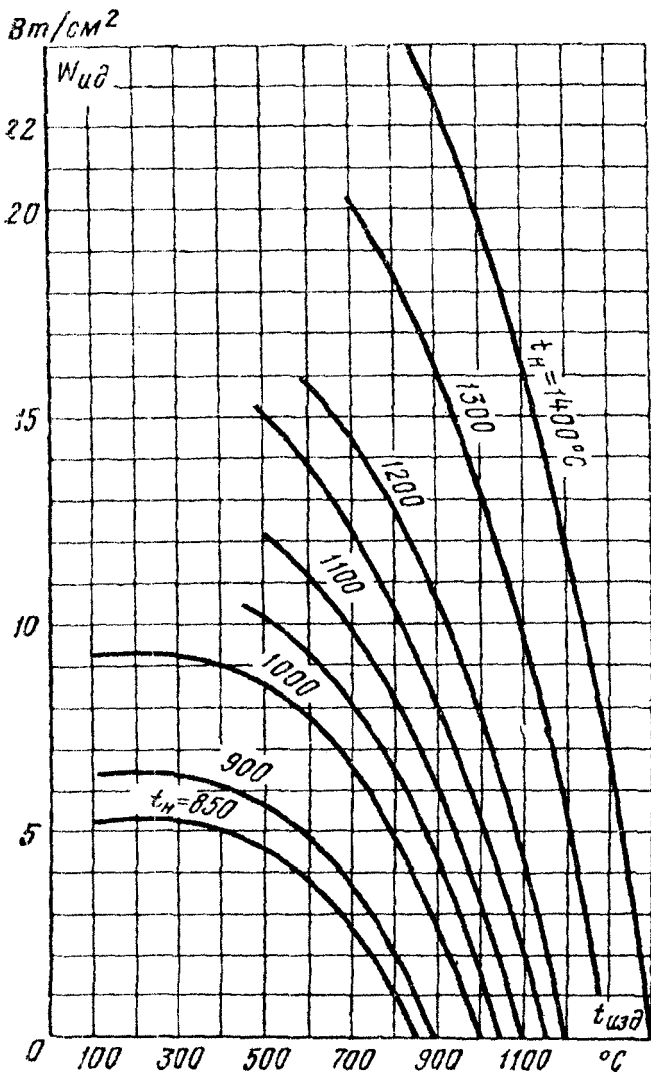


Рис. 2.8. График допустимых удельных поверхностных мощностей для идеального нагревателя при нагреве стали

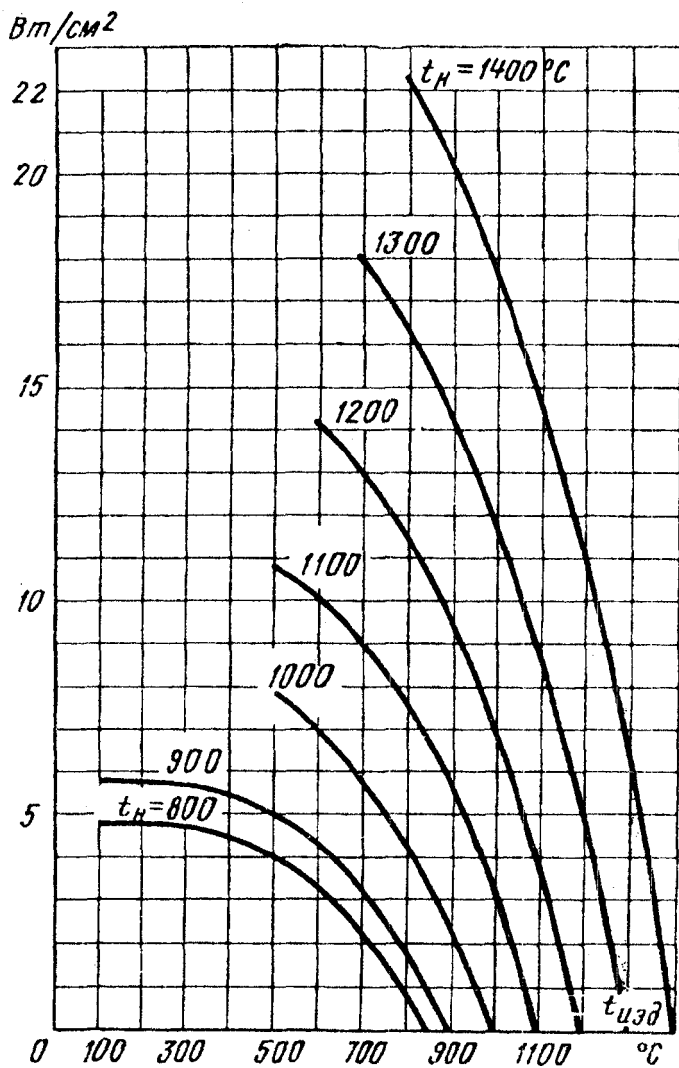


Рис. 2.9. График допустимых удельных поверхностных мощностей для идеального нагревателя при нагреве меди

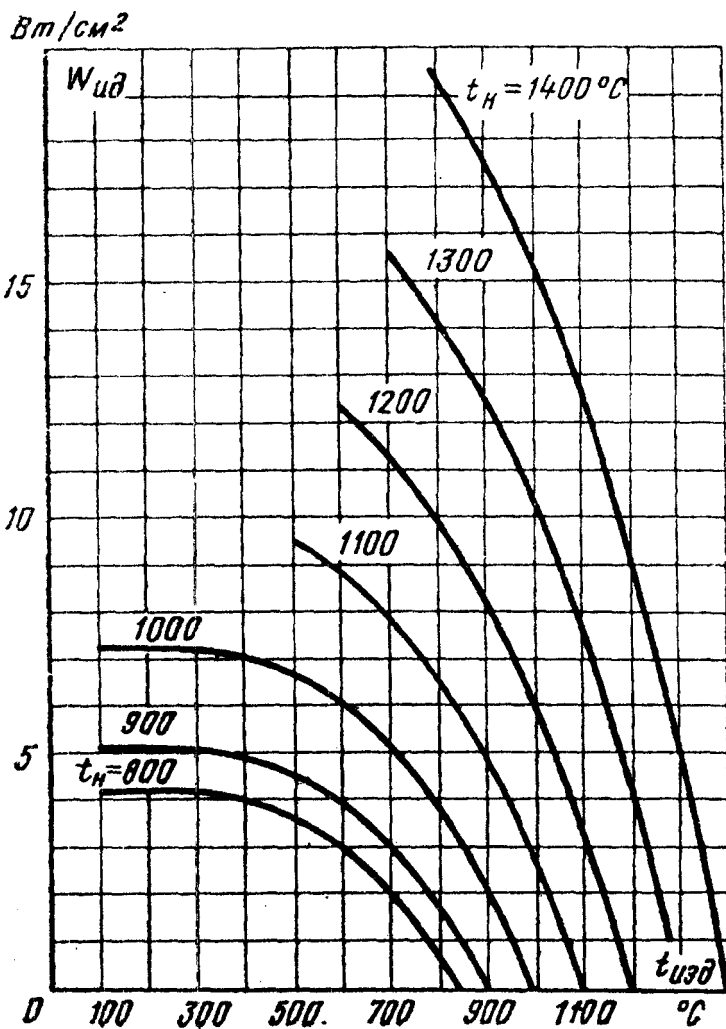


Рис. 2.10. График допустимых удельных поверхностных мощностей для идеального нагревателя при нагреве латуни

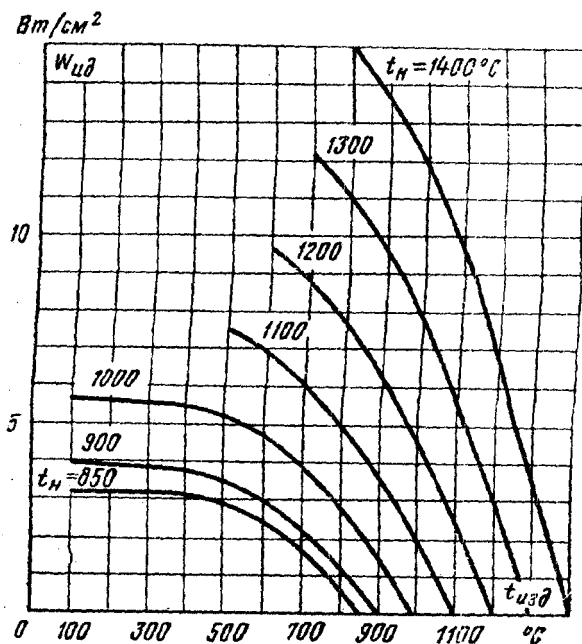


Рис. 2.11. График допустимых удельных поверхностных мощностей для идеального нагревателя при нагреве стали в защитной атмосфере

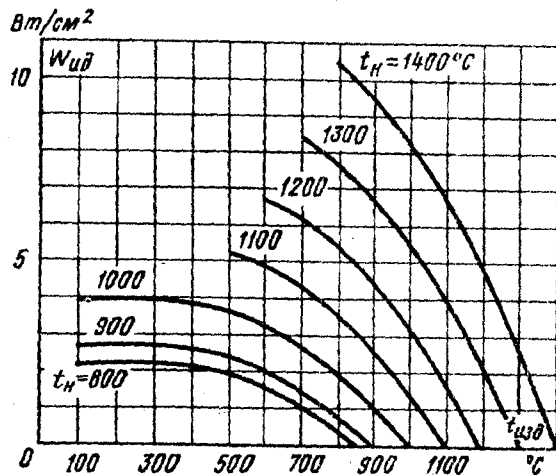


Рис. 2.12. График допустимых удельных поверхностных мощностей для идеального нагревателя при нагреве алюминия

Рекомендуемые отношения $W/W_{ид}$
при нагреве различных материалов ($\gamma = 0,25$)

Тип нагревателя	Материал нагреваемых изделий				
	Сталь, $\varepsilon = 0,8$	Медь, $\varepsilon = 0,7$	Латунь, $\varepsilon = 0,6$	Сталь в защит- ной ат- мосфере, $\varepsilon = 0,45$	Алюми- ний, $\varepsilon = 0,3$
Ленточный зигзагообразный нагреватель ($d/b = 0,8$)	0,46	0,47	0,48	0,51	0,54
Плоский ленточный зигзагообразный нагреватель ($d/b = 0,2$)	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81
Литой нагреватель ($d/b = 0,5$)	0,61	0,62	0,64	0,67	0,7
Проволочные спирали, открытые и на трубках ($s/b = 2,0$; $S/D = 2,0$)	0,46	0,47	0,48	0,49	0,51
Ленточный зигзаг в пазу ($d/b = 0,8$; $h/c = 0,3$; $S/c = 1,25$)	0,44	0,45	0,46	0,50	0,54
Проволочная спираль в пазу ($s/d = 2,0$; $S/D = 2,0$; $h/c = 1,5$; $S/c = 1,5$)	0,31	0,32	0,33	0,34	0,36
Ленточный зигзаг на керамической полочке ($d/b = 0,8$; $c' = 10,5$ см)	0,41	0,43	0,44	0,47	0,5
Проволочная спираль на керамической полочке ($S/D = 2,0$; $s/d = 2,0$; $c' = 10,5$ см)	0,39	0,40	0,41	0,44	0,47
Проволочный зигзаг ($s/d = 3,0$)	0,68	0,69	0,71	0,73	0,75

Все параметры, приведенные в табл. 2.6, проиллюстрированы на схемах в [1, прил. 7]

Таким образом, определив из графиков значение $W_{ид}$ соответствующее нагреваемому материалу, температуре его нагрева и рекомендуемой температуре нагрева материала нагревателя, и умножив на отношение $W/W_{ид}$, взятое для того же нагреваемого материала и выбранной системы нагревателей, получим расчетную удельную поверхностную мощность реального нагревателя, по которой определяют размер нагревателя.

Полученные расчетом диаметр или толщина нагревателя сравниваются с рекомендуемыми, приведенными в табл. 2.7 и отвечающими требованиям механической прочности в зависимости от температуры печи и материала нагревателя.

Таблица 2.7

Рабочая температура печи, °С	Максимальное сечение $b \times a$, мм	Максимальный диаметр d , мм	Материал нагревателя
300–600	10×1	2	Фехраль, нихром
600–800	15×1,5	1–4	Нихром
800–1000	20×2,0	4–5	Нихром
1000–1100	25×2	6–7	Нихром, ЭИ-595
1100–1200	25×3	7–8	Нихром, ЭИ-626

Окончательные размеры нагревателей корректируются в соответствии с размерами нагревателей, выпускаемых промышленностью согласно ГОСТ 2615 и ГОСТ 2238.

Для упрощения расчетов по определению сечения нагревателей можно использовать графики, представленные на рис. 2.13 и 2.14 и связывающие между собой мощность печи (одной фазоветви), удельную поверхностную мощность W и размеры нагревателя – его диаметр d (для проволоки) или толщину a (для ленты). Графики построены для стандартных напряжений 380, 220 и 127 В, для материала с удельным сопротивлением $\rho = 1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и отношения ширины ленты к толщине $m = 10$. При помощи этих графиков по известной мощности нагревателя P и данному напряжению можно быстро определить диаметр проволоки d или толщину ленты a , соответствующие определенной удельной поверхностной мощности W .

Если нагреватель выполняется из материала, имеющего иное удельное электрическое сопротивление, чем принятое при построении этих графиков, то так как W изменяется пропорционально ρ , при определении значений d и a по графикам в последние необходимо подставлять значения W , деленные на действительное значение удельного сопротивления материала нагревателя при рабочей температуре.

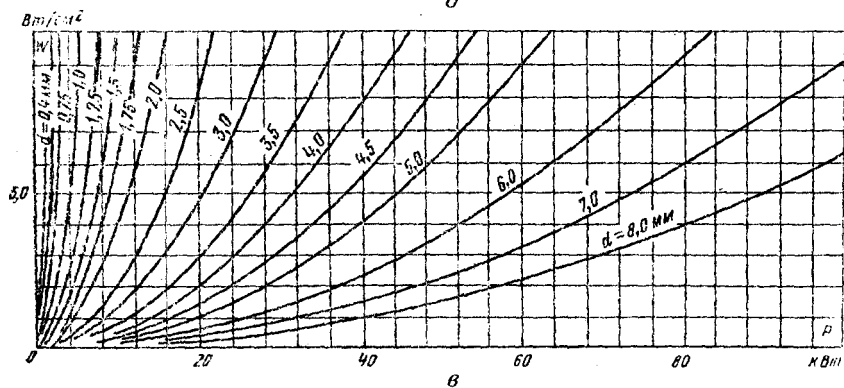
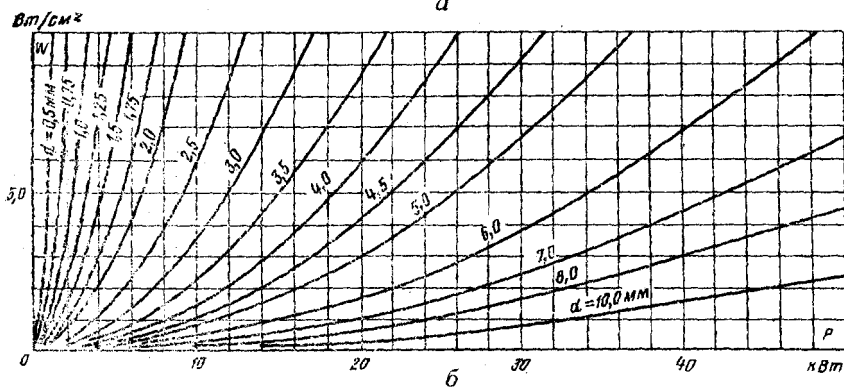
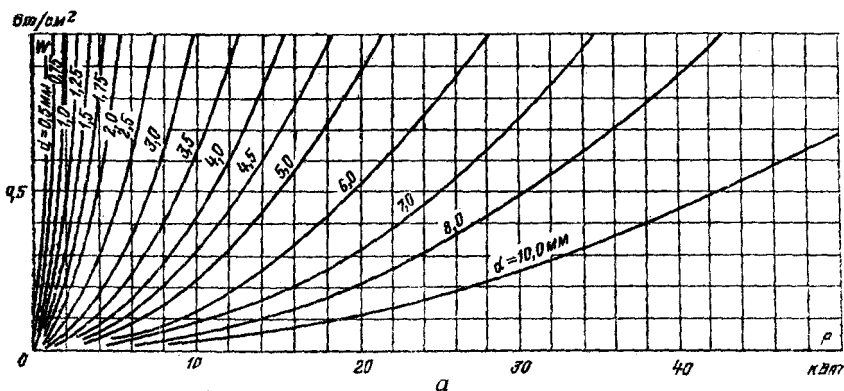


Рис. 2.13. Графики удельных поверхностных мощностей.

Кривые $W = f(P, U, d)$ для проволочных нагревателей, а) $U = 127 \text{ В}$, $W = 2,77P^2/d^3 \text{ Вт/см}^2$; б) $U = 220 \text{ В}$, $W = 0,925P^2/d^3 \text{ Вт/см}^2$; в) $U = 380 \text{ В}$, $W = 0,308P^2/d^3 \text{ Вт/см}^2$

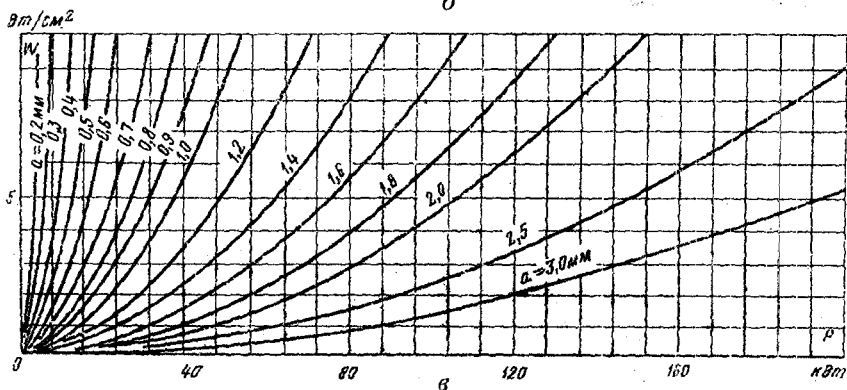
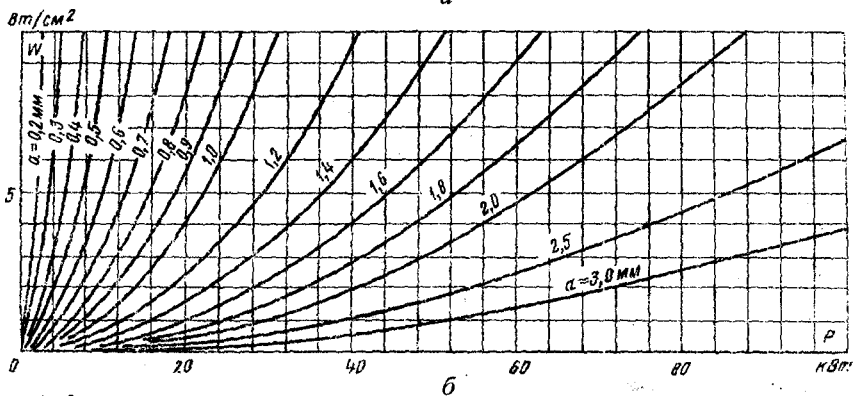
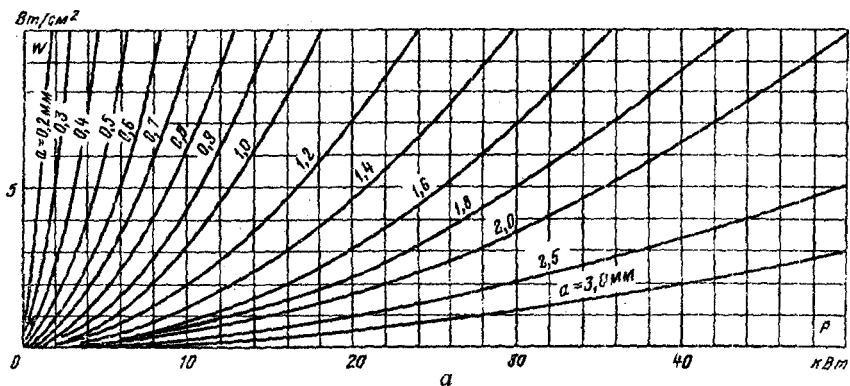


Рис. 2.14. Графики удельных поверхностных мощностей.

Кривые $W = f(P, U, a)$ для ленточных нагревателей с $b/a = 10$, а) $U = 127$ В, $m = 10$, $W = 0,031P^2/a^3$ Вт/см²; б) $U = 220$ В, $m = 10$, $W = 0,0103P^2/a^3$ Вт/см²; в) $U = 380$ В, $m = 10$, $W = 0,00345P^2/a^3$ Вт/см²

По полученным размерам нагревателей, их сечению и длине следует произвести их размещение в камере печи. Расположение нагревателей в печи должно соответствовать расположению в ней изделий, для того чтобы обеспечить наилучшие условия для теплопередачи.

На рис. 2.15 показано устройство обычного нихромового проволочного нагревателя, принятые конструкции закрепления его на своде, стенках и в поду печи и конструкция выводов.

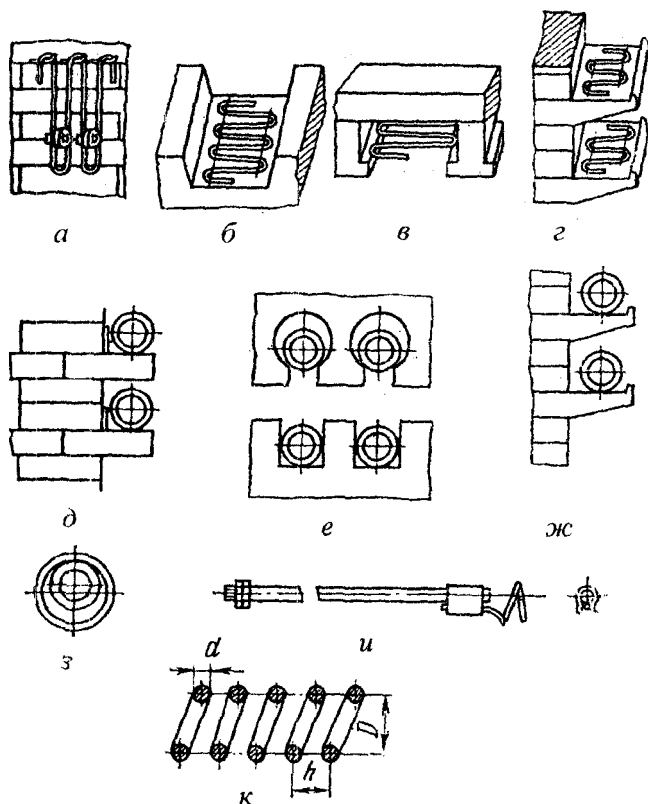


Рис. 2.15. Проволочные нагреватели:

а – проволочный зигзагообразный нагреватель на металлических крючках на боковой стенке; *б* – проволочный зигзагообразный нагреватель в поду; *в* – то же в своде; *г* – то же на керамических полочках; *д* – проволочная спираль на выступающих кирпичах боковой стены с привязкой к крючкам; *е* – проволочная спираль в сводовых камнях и в пазах пода; *ж* – проволочная спираль на керамических полочках; *з* – проволочная спираль на керамической трубке; *и* – вывод проволочного нагревателя; *к* – условное обозначение размеров проволочного нагревателя

Соотношения между шагом h спирали и ее диаметром D и диаметром проволоки d выбираются таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить устойчивую их жесткость и в то же время не затруднить теплоотдачу от них к изделиям. Чем больше диаметр спирали и чем чаще ее шаг, тем легче разместить в печи нагреватели, но с увеличением диаметра уменьшается прочность спирали, увеличивается склонность ее витков лечь друг на друга. С другой стороны, с ростом густоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части ее витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование поверхности спирали. Практика установила вполне определенные рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки от 3 до 7 мм диаметром. Эти соотношения следующие: $h \geq 2d$ и $D = (6-8)d$ для нихромов и $D = (4-6)d$ для менее прочных железохромалюминиевых сплавов.

Для более тонких проволок отношение D/d , а также шаг h спирали обычно берутся больше. Ниже приведены максимальные отношения диаметра спирали к диаметру проволоки (D/d) для сплавов на никелевой основе и для железохромалюминиевых сплавов.

Температура нагревателя, °С	D/d для сплавов	
	хромоникелевых	железохромалюминиевых
1000	10	8
1100	9	7
1200	8	6
1300	—	5

В последнее время все большее распространение получают спирали нагревателей на керамических трубках (рис. 2.16). Такие нагреватели с точки зрения излучения и размещения мощности практически эквивалентны свободно излучающим спиралям, т.е. они более эффективны, чем спирали в пазах или на полочках. В них отдельные витки не могут лечь друг на друга, поэтому отношения D/d при необходимости могут быть увеличены до 8–10.

Отношение внутреннего диаметра спирали к наружному диаметру трубки у таких нагревателей может быть принято равным 1,1–1,2, расстояние между осями трубок 1,5–2 диаметра спирали.

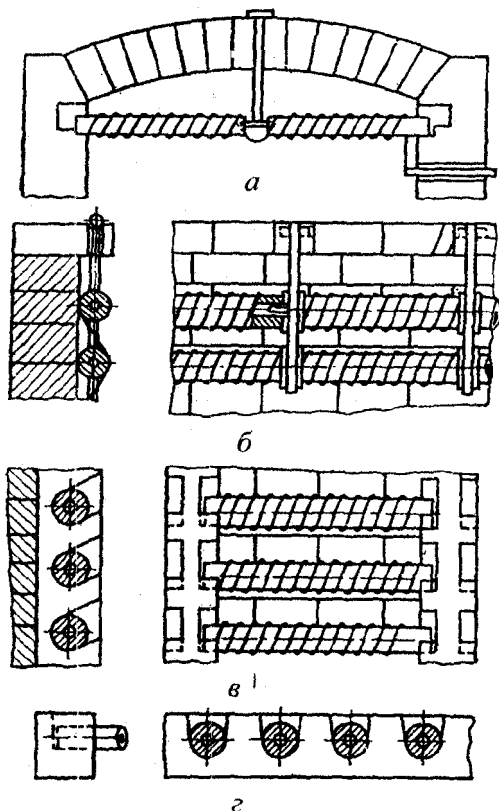


Рис. 2.16. Конструкции проволочных спиральных нагревателей на керамических трубках:

а – сводовые нагреватели; *б* – трубки на боковых стенках, крепление на жароупорных подвесках; *в* – то же в пазах керамических столбиков; *г* – трубки в полу

При изготовлении спиральных нагревателей необходимо тщательно следить за равномерностью навивки, так как в местах сгущений витков могут быть значительные перегревы, что ведет к снижению срока службы нагревателя.

Оптимальной (при данной мощности, отнесенной к 1 м^2 стенки) формой конструкции электронагревателя по эксплуатационным расходам, сроку службы и другим показателям является изготовленный из круглой проволоки максимального сечения и определенный рас-

четом виток. При подвеске на штырях высота зигзага для боковых электронагревателей из хромоникелевых сплавов не должна превышать 300 мм, из железохромалюминиевых 200–250 мм.

Для нагревателей, расположенных на своде, значения максимальной высоты зигзага приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Высота зигзага сводовых нагревателей

Место и способ крепления нагревателей	Тип сплава	Максимальная высота зигзага нагревателя при различных диаметрах проволоки, мм			
		Ø 6–7	Ø 8–9	Ø 10–11	Ø 12–14
Нагреватель сводовый, крепящийся на двух крючках	Cr – Ni	215	250	280	300
	Fe – Cr – Al	150	170	200	220
Нагреватель сводовый, свободно лежащий на двух опорах	Cr – Ni	170	200	225	245
	Fe – Cr – Al	130	160	180	200

Высоты зигзагов подовых нагревателей могут быть приняты большими на 20–30 %.

Расстояние h между осями ветвей зигзагообразного нагревателя, крепящегося на керамических плитках, зависит от размеров керамической плитки (в настоящее время имеются плитки с шагом 12,5 и 17,5 мм); для нагревателей, крепящихся на штырях, это расстояние должно быть не менее 2,75 диаметра проволоки нагревателя.

Ленточные зигзагообразные нагреватели, как правило, крепятся на стенках и своде с помощью крючков (рис. 2.17). Кроме крючка, на котором держится петля нагревателя, устанавливается распорный крючок, служащий для предотвращения замыкания петель. На поду нагреватели крепятся на специальных керамических фасонах с фиксацией шага или свободно укладываются на керамических опорах.

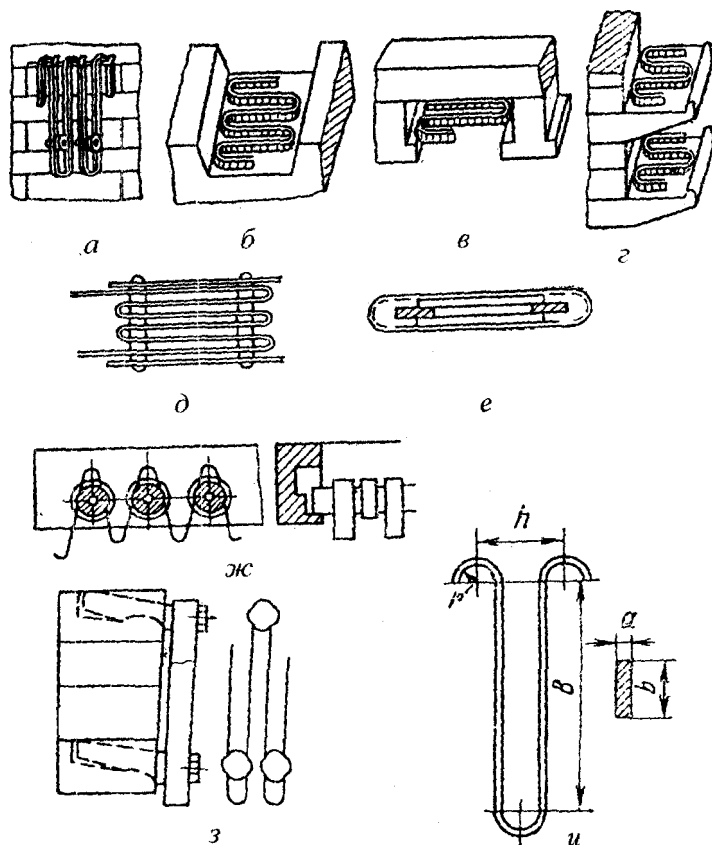


Рис. 2.17. Конструкции ленточных нагревателей:

a – ленточные зигзагообразные нагреватели на боковой стенке на металлических крючках; *b* – ленточный зигзагообразный нагреватель в поду; *v* – то же в своде; *z* – то же на керамических полочках; *d* – выемной высокотемпературный рамочный элемент; *e* – низкотемпературный рамочный элемент; *ж* – нагреватель «плоская волна» на керамических трубках; *z* – ленточный зигзагообразный нагреватель на выемных крючках; *u* – условное обозначение размеров ленточного зигзагообразного нагревателя

При конструировании ленточных нагревателей следует учесть что отношение расстояния между осями соседних ветвей к ширине ленты b должно быть не менее 0,9. Максимальные высоты зигзага для различных способов крепления ленты приведены в табл. 2.9.

Высота зигзага ленточных нагревателей, мм

Температура нагревателя, °С	Хромоникелевые сплавы						Железохромалюминиевые сплавы					
	Нагреватель подвешен на крючках (стена)			Нагреватель размещен на двух опорах (под, свод)			Нагреватель подвешен на крючках (стена)			Нагреватель размещен на двух опорах (под, свод)		
	ширина ленты, мм			ширина ленты, мм			ширина ленты, мм			ширина ленты, мм		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1100	300	400	450	200	270	320	250	370	420	180	250	300
1200	200	300	350	160	220	270	150	230	280	140	175	200
1300	—	—	—	—	—	—	130	200	250	120	150	170

Если подобранный и рассчитанный нагреватель вызывает большие затруднения при его установке в печи, следует заменить материал нагревателя другим, имеющим более высокое омическое сопротивление. Если нагреватели ленточные, следует перейти на проволочные, которые легче размещаются, уменьшить питающее напряжение и увеличить мощность отдельных ветвей.

Выводы нагревателей выпускаются наружу на 75–150 мм и изготавливаются из того же материала, что и нагреватели, однако сечение их делают в три–пять раз больше во избежание нагрева и быстрого перегорания.

Длина вывода

$$l_{\text{в}} = S_{\text{ст}} + (0,075 - 0,15) \text{ м},$$

где $S_{\text{ст}}$ – толщина стенки печи.

Сварку обычно осуществляют электродом того же химического состава, что нагреватель и выводы.

На основании проведенных исследовательских работ рекомендуются следующие материалы для выводов нагревателей в зависимости от температуры:

до 700 °С

сталь марки 1Х13

700–1100 °С

сталь марки Х25

1100–1300 °С

сталь марки ЭИ-595 или ЭИ-626

Найденные размеры нагревателей следует проверить по действительной поверхностной нагрузке:

$$W_d = \frac{10^2 P_{эл}}{Sl}, \text{ Вт/см}^2,$$

где S – периметр сечения нагревателя мм.

Действительная поверхностная нагрузка должна быть меньше или равной допустимой $[W]$.

После определения размеров нагревателя и размещения его в рабочей камере печи (зоны) можно произвести проверочный расчет, для чего надо определить его активную поверхность $F_{акт}$ из формулы

$$F_{акт} = \frac{W}{W_{ид}} F_{нагр} (1 - \gamma),$$

а затем составить уравнение теплопередачи между нагревателем (его активной поверхностью) и изделием:

$$P_{пол} = \frac{5,76 \cdot F_{акт.нагр}}{\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{F_{акт.нагр}}{F_{изд}} \left(\frac{1}{\epsilon_{изд}} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.19)$$

или

$$P_{пол} = \frac{5,76 \cdot F_{изд}}{\frac{1}{\epsilon_{изд}} + \frac{F_{изд}}{F_{акт.нагр}} \left(\frac{1}{\epsilon_n} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.20)$$

в зависимости от того, какая из поверхностей, $F_{акт.нагр}$ или $F_{изд}$, меньше. По формулам (2.19) или (2.20) могут быть проверены температуры нагревателей в работе, определено, насколько они соответствуют принятым при расчете рекомендуемым температурам, причем активная поверхность нагревателя вычисляется по его фактическим размерам.

Пример. Шахтная цилиндрическая печь предназначена для нагрева валов, температура нагрева 950 °С, мощность печи принята 75 кВт, напряжение питания 220 В. Так как печь имеет высоту 2,5 м, то делим ее на две равные зоны по высоте мощностью по 37,5 кВт каждая. Нагреватели располагаются только на боковых стенках шахты печи.

При рабочей температуре 950 °С могут быть использованы следующие материалы для нагревательных элементов (см. табл. 2.5): Х15Н60; Х20Н80; ОХ23Ю5А (ЭИ-595); ОХ27Ю5А (ЭИ-626) – прерывистый режим, так как печь отключается каждые 6,5 ч.

Сплав Х15Н60 может быть использован лишь для работы при максимально допустимой температуре, причем из-за малого допустимого перепада температур пришлось бы пойти на низкие значения удельной поверхностной мощности ($W_{\text{нд}} \approx 1,4 \text{ Вт/см}^2$), поэтому заранее можно отказаться от использования этого сплава. Сплав ОХ27Ю5А (ЭИ-626) вряд ли уместен при 950 °С, так как он дороже и более жесткий по сравнению со сплавом ОХ23Ю5А (ЭИ-595). Сплавы ОХ23Ю5А (ЭИ-595) и Х20Н80 примерно равноценны, но так как сплав Х20Н80 намного дороже, а его большая пластичность и механическая прочность в данной печи не имеют решающего значения, то наиболее целесообразным следует признать использование сплава ОХ23Ю5А (ЭИ-595).

Принимаем рабочую температуру сплава 1020 °С (несколько превышающую рекомендуемую 1000 °С), для этой температуры по графику рис. 2.8 определяем $W_{\text{нд}} = 1,9 \text{ Вт/см}^2$. Теоретически в данном случае может быть использован целый ряд систем нагревателей. Практически, однако, из конструктивных соображений, как более сложные, отпадают нагреватели: плоский ленточный, литой, ленточный и проволочный в пазу, а также проволочный на трубках (ввиду малого диаметра шахты). Таким образом, могут быть использованы ленточный и проволочный зигзагообразный нагреватель на крючках и проволочная спираль на керамической полочке. Проверим ленточный зигзаг и проволочную спираль.

Для ленты при нагреве стали по табл. 2.6 имеем: $W/W_{\text{нд}} = 0,46$ и $W = 0,88 \text{ Вт/см}^2$ и для проволоки на керамической полочке $W/W_{\text{нд}} = 0,39$ и $W = 0,74 \text{ Вт/см}^2$.

Принимаем, что нагреватели соединены в звезду, так как мощность зоны невелика, фазовое напряжение 127 В, мощность каждой фазы $37,5/3 = 12,5$ кВт.

Рассчитываем ленту:

$$m = \frac{b}{a} = 10;$$

$$\rho_{1000} = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м (см. табл. 2.4);}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot P_{\text{эл}}^2 \cdot 10^{11}}{2m(m+1) \cdot U^2 \cdot W}};$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^{11} \cdot 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 12,5^5}{2 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 127^2 \cdot 0,88}} = \sqrt[3]{7,3} = 1,94 \text{ мм.}$$

Выберем ближайшее стандартное сечение, ленту 2×20 мм. Сопротивление фазы

$$R = \frac{127^2}{12,5 \cdot 10^3} = 1,29 \text{ Ом,}$$

сечение ленты

$$q = 20 \cdot 2,0 = 40 \text{ мм}^2,$$

отсюда длина ленты на фазу

$$L = \frac{1,29 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{1,46 \cdot 10^{-6}} = 35,3 \text{ м.}$$

Действительная удельная поверхностная мощность

$$W = \frac{12,5 \cdot 10^3}{2 \cdot (2 + 0,2) \cdot 3530} = 0,8 \text{ Вт/см}^2.$$

Масса нагревателя одной фазы

$$G = \rho_m Lq = 7270 \cdot 35,3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 10,3 \text{ кг};$$

масса нагревателей всей печи (запас 10 %)

$$G = 1,1 \cdot 6 \cdot 10,2 = 67 \text{ кг}.$$

Размещаем нагреватель в шесть рядов по высоте, по одному ряду на фазу, высота каждого ряда $2500/6 \approx 400$ мм, высоту зигзага принимаем равной 330 мм, длина каждой волны 660 мм, число волн на фазу $35300/660 = 53$.

Длина каждого нагревателя

$$3,14 \cdot 800 - 100 = 2400 \text{ мм}$$

(100 мм – расстояние между выводами), отсюда шаг

$$h = 2400/53 = 45,3 \text{ мм},$$

что более чем в два раза превосходит ширину ленты.

Проверим температуру нагревателя в работе.

Поверхность нагревателя

$$F_1 = 6 \cdot 35,3 \cdot 2(0,02 + 0,002) = 9,3 \text{ м}^2.$$

$$a = 0,002 \text{ м}; b = 0,02 \text{ м}; d = 0,045/2 - 0,002 = 0,0206 \text{ м}.$$

Коэффициент облучения определяют [1] по выражению

$$\Phi_{12н} = \frac{a + b + d - \sqrt{b^2 + d^2}}{2(a + b)}.$$

Здесь индекс «н» подчеркивает, что коэффициент облучения характеризует экранирование нагревателей отдельными гранями друг друга.

$$\Phi_{12н} = \frac{0,002 + 0,02 + 0,0206 - \sqrt{0,02^2 + 0,0206^2}}{2(0,02 + 0,002)} = 0,316,$$

$$\varphi_{12н.н} = \frac{0,02 + 0,33 + 0,07 - \sqrt{0,02^2 + 0,07^2}}{(0,02 + 0,33)} = 0,99;$$

$$F_{12} = F_{13} = 9,3 \cdot 0,316 \cdot 0,99 = 2,91 \text{ м}^2;$$

$$F_{32} = 6,28 - 2,88 = 3,4 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери стен печи равны 1,2·7525 Вт, следовательно, расчетный коэффициент тепловых потерь

$$\gamma = \frac{1,2 \cdot 7\,525 \cdot 2}{75 \cdot 10^3} = 0,232.$$

Отсюда активная поверхность нагревателя

$$F_{\text{акт}} = \frac{0,76(2,91^2 + 2 \cdot 2,91 \cdot 3,37)}{0,76 \cdot 2,91 + 3,37} = \frac{21,3}{5,58} = 3,82 \text{ м}^2.$$

Здесь $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,8$, значит, и $c_{12} = c_{13} = c_{32}$.

Поверхность изделия

$$F_2 = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 2 = 2,51 \text{ м}^2.$$

Отсюда уравнение теплопередачи системы нагреватель-изделие

$$0,76 \cdot 75 \cdot 10^3 = \frac{5,76 \cdot 2,51}{\frac{1}{0,8} + \frac{2,51}{3,82} \left(\frac{1}{0,8} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{950 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

и

$$t_{\text{нагр}} = 100 \sqrt[4]{27\,950} - 273 = 1010 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Рассчитываем диаметр проволоки:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^{11} \cdot 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 12,5^2}{3,14^2 \cdot 127^2 \cdot 0,74}} = \sqrt[3]{775} = 9,2 \text{ мм}.$$

Так как получился слишком большой диаметр проволоки, переключаем нагреватели на треугольник. В этом случае

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^{11} \cdot 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 12,5^2}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 0,74}} = \sqrt[3]{258} = 6,37 \text{ мм.}$$

Выберем проволоку диаметром 6,5 мм, ее сечение

$$\frac{3,14 \cdot 6,5^2}{4} = 33,2 \text{ мм}^2;$$

длина проволоки нагревателя фазы

$$L = \frac{3 \cdot 1,29 \cdot 33,2 \cdot 10^6}{1,46 \cdot 10^{-6}} = 88,0 \text{ м.}$$

Действительная удельная поверхностная мощность

$$W = \frac{12,5 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 6,5 \cdot 10^{-1} \cdot 88 \cdot 10^2} = 0,7 \text{ Вт/см}^2.$$

Масса нагревателя на фазу

$$G = 7270 \cdot 88,0 \cdot 33,2 \cdot 10^{-6} = 21,2 \text{ кг;}$$

масса нагревателей всей печи

$$G = 1,1 \cdot 6,0 \cdot 21,2 = 140 \text{ кг.}$$

Размещаем нагреватель на стандартных керамических полочках, по четыре ряда полочек по высоте на фазу – ветвь, всего 24 ряда спиралей на печь. Полочки устанавливаются по высоте через 1,5 кирпича, т.е. с шагом 100 мм.

Принимаем диаметр спирали 40 мм, длина одного витка 126 мм, число витков $88\ 000/126 = 700$, или по 175 витков на спираль, отсюда шаг спирали

$$h = 2400/175 = 14,0 \text{ мм.}$$

Так как шаг спирали в 1,4 раза превосходит принятый, то проверки температуры нагревателя не делаем, она будет ниже 1020 °С.

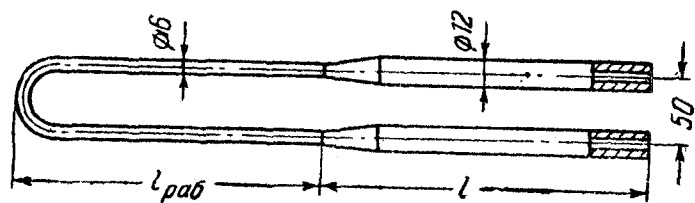
В данном случае по однократному расходу материала лента намного выгоднее проволоки, однако срок службы их также разный. По графику срок службы нагревателя из проволоки сплава ОХ23Ю5А диаметром 1,0 мм при температуре 1020 °С составляет около 2500 ч, следовательно, проволочный нагреватель диаметром 6,5 мм должен иметь срок службы $6,5 \cdot 2500 = 16250$ ч. Аналогично для ленты срок службы в 2500 ч может быть отнесен к ее толщине 0,5 мм, в нашем случае взята лента 2×20 мм, следовательно, ее срок службы будет равен $4 \cdot 2500 = 10000$ ч.

Эксплуатационный расход сплава, отнесенный к 1000 ч службы, для проволоки будет равен $141/16,25 = 8,7$, а для ленты $67/10 = 6,7$. Следовательно, как по однократному, так и по эксплуатационному расходу лента оказалась выгоднее проволоки.

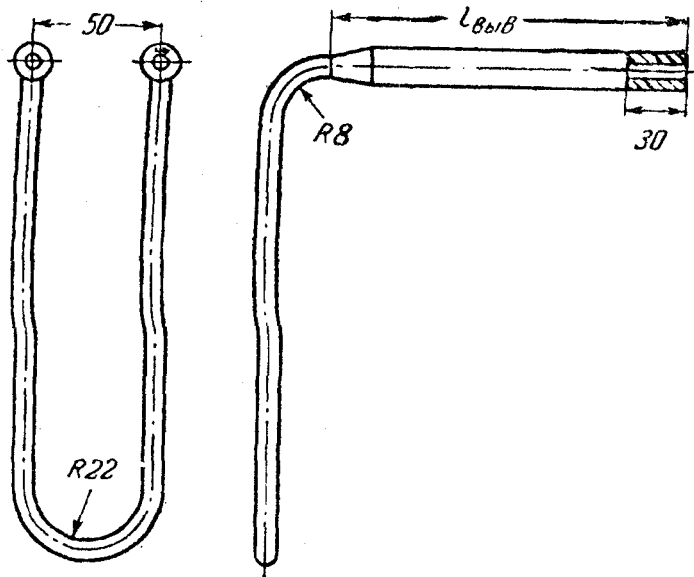
2.5.2. Расчет керамических электронагревателей

В последнее время в электропечах сопротивления применяются нагреватели из дисцилида молибдена (ДМ), предназначенные для создания в печах высокой температуры до 1500–1600 °С. Нижний температурный предел их рационального применения составляет 1450 °С. При более низких температурах выгоднее применять карборундовые и металлические нагреватели.

В промышленности их изготавливают в основном U-образной формы с длиной рабочей части от 180 до 800 мм и с двумя прямыми выводами или с выводами, отогнутыми под углом 90° (с Г-образным нагревателем) длиной от 250 до 700 мм. Диаметр рабочей части всех видов нагревателей ДМ составляет 6 мм, а диаметр выводов – 12 мм (рис. 2.18). Электрическое сопротивление нагревателей ДМ весьма низкое и резко возрастает с повышением температуры. Поэтому электропечи всегда снабжены понижающими трансформаторами с необходимым диапазоном ступеней напряжения. Удельное электрическое сопротивление при 20 °С приблизительно равно $\approx 0,4$ (Ом·мм²)/м и возрастает до 3,75 (Ом·мм²)/м при 1500 °С. Основные характеристики нагревателей ДМ приведены в табл. 2.10.



a



б

Рис. 2.18. Эскиз U-образных нагревателей ДМ:
 а – с прямыми выводами; б – с выводами, отогнутыми под углом 90 °С
 (Г-образные нагреватели)

Таблица 2.10

Допустимые мощности P , удельные поверхностные мощности W и напряжения U различных типоразмеров нагревателей ДМ при позиционном и непрерывном регулировании температуры при $\alpha_c = 1$ ($\varepsilon = 0,8$) и $\alpha_p = 1$

Тип нагревателя	Температура печи, °С											
	1400				1500				1600			
	при позиционном регулировании		при непрерывном регулировании		при позиционном регулировании		при непрерывном регулировании		при позиционном регулировании		при непрерывном регулировании	
	P , кВт	U , В	P , кВт	U , В	P , кВт	U , В	P , кВт	U , В	P , кВт	U , В	P , кВт	U , В
1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
ДМ-180/250	1,26	8,5	1,82	10,4	1,06	7,95	1,27	8,7	0,606	6,00		
ДМ-180/400	0,0108	1,35	9,1	11,2	1,135	8,5	1,36	9,3	0,650	6,45		
ДМ-250/250	0,0068	1,67	11,2	13,9	1,41	10,5	1,70	11,6	0,805	8,00		
ДМ-250/400	0,0108	1,76	11,8	14,5	1,49	11,1	1,78	12,3	0,89	8,60		
ДМ-315/250	0,0068	2,05	13,7	16,9	1,74	12,9	2,06	14,1	0,99	9,80		
ДМ-315/400	0,0108	2,14	14,3	17,6	1,81	13,4	2,14	14,6	1,03	10,4		
ДМ-315/500	0,0135	2,20	14,7	18,2	1,86	13,8	2,20	15,1	1,06	10,5		
	Развернутая длина рабочей части, м		Поверхность рабочей части, см ²		Сопротивление двух выводов при средней температуре 700 °С, 2R _г , Ом							

Окончание табл. 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ДМ-400/250			0,0068	2,54	17,0	3,57	20,7	2,16	16,0	2,54	17,5	1,23	12,1
ДМ-400/400	0,83	156	0,0108	2,64	17,6	3,80	21,7	2,23	16,6	2,63	18,1	1,27	12,5
ДМ-400/500			0,0135	2,70	18,0	3,88	22,2	2,28	16,9	2,69	18,5	1,30	12,8
ДМ-500/250			0,0068	3,13	20,9	4,52	25,8	2,64	19,6	3,14	21,6	1,51	15,0
ДМ-500/400	1,03	194	0,0108	3,22	21,5	4,65	26,6	2,72	20,2	3,22	22,0	1,55	15,3
ДМ-500/500			0,0135	3,29	22,0	4,72	27,0	2,77	20,5	3,28	22,5	1,58	16,6
ДМ-630/250			0,0068	3,87	26,0	5,60	31,9	3,28	24,4	3,88	26,7	1,88	18,5
ДМ-630/400	1,29	243	0,0108	3,96	26,5	5,72	32,7	3,35	24,8	3,97	27,2	1,93	13,0
ДМ-630/500			0,0135	4,01	27,0	5,82	33,2	3,40	25,2	4,04	27,7	1,95	19,2
ДМ-800/700	1,63	307	0,0200	5,15	34,5	7,44	42,5	4,36	33,2	5,17	35,4	2,48	24,5
Допустимая удельная поверхностная мощность W , Вт/см ²			15,3			22,2		13		15,4		7,4	

Примечания:

1. По желанию заказчика нагреватели всех типов могут быть изготовлены Г-образными.
2. Обозначение нагревателей ДМ-315/400: нагреватель из дисцилида молибдена; 315 – длина рабочей части; 400 – длина вывода.
3. Нагреватель любого типа может быть заказан с выводами следующего размера по длине 125, 150, 185, 200, 250, 300, 400, 500 мм.

Определив удельную поверхностную мощность рабочей части нагревателя ДМ

$$W = 0,87\alpha_c W_{ид} \quad (2.21)$$

при расчете печей и зон первой группы (садочные печи, зоны выдержки методических печей) или $W = 0,87\alpha_c\alpha_p W_{ид}$ при расчете зон второй группы (зоны нагрева методических печей), где α_c – коэффициент, учитывающий зависимость W от $c_{кр}$;

α_p – коэффициент, учитывающий влияние размеров садки на W , т. е. отношение $F_{ид}/F_{ст}$,

можно вычислить полную мощность рабочей части одного нагревателя по площади ее наружной поверхности $f_{раб}$, см²:

$$P'_{раб} = 10^{-3} W f_{раб}, \text{ кВт.} \quad (2.22)$$

Тогда полная мощность нагревателя P с учетом мощности, выделяемой в выводах, будет

$$P = P'_{раб} \left(1 + \frac{2R'_в}{R'_{раб}} \right), \text{ кВт,}$$

где $R'_в$ – сопротивление одного вывода нагревателя, соответствующее температуре t °С, Ом;

$R'_{раб}$ – сопротивление рабочей части при температуре t °С, Ом.

Для нагревателей с диаметром выводов 12 мм и диаметром рабочей части 6 мм при средней температуре по длине выводов 700 °С получено

$$P = P'_{раб} \left(1 + \frac{0,75}{\rho'_{раб}} \cdot \frac{l_в}{l_{раб}} \right), \text{ кВт,} \quad (2.23)$$

где $\rho'_{\text{раб}}$ – удельное электрическое сопротивление рабочей части нагревателя при температуре t °С, Ом·мм²/м.

$l_{\text{в}}$, $l_{\text{раб}}$ – длина одного вывода и развернутая длина рабочей части нагревателя, м.

Полное сопротивление нагревателя (рабочей части с двумя выводами) рассчитывается по формуле

$$R = 3,54 \cdot 10^{-2} (\rho'_{\text{раб}} l_{\text{раб}} + 0,75 l_{\text{в}}), \text{ Ом.} \quad (2.24)$$

Рабочее напряжение одного нагревателя

$$U = \sqrt{10^3 PR}, \text{ В,} \quad (2.25)$$

где R – сопротивление нагревателя, Ом.

Зная необходимую мощность печи, полученную из теплового расчета, и ориентируясь на значения мощности и напряжения одного нагревателя, можно определить необходимое для работы печи количество нагревателей, подобрать питающий трансформатор и необходимую схему соединения нагревателей.

Пример. Расчет нагревателя ДМ. Исходные данные:

- 1) температура нагреваемого изделия 1450 °С;
- 2) степень черноты поверхности изделия $\varepsilon = 0,8$;
- 3) применяется нагреватель типа ДМ-315/500;
- 4) регулирование печи – двухпозиционное.

Определить мощность и напряжение одного нагревателя. Для $\varepsilon = 0,8$ имеем $\alpha_c = 1$.

Температуре печи $t_{\text{п}} = 1450$ °С соответствует допустимая температура нагревателя $t_{\text{н}} = 1630$ °С.

Мощность $W_{\text{ид}}$ определяем принимая температуру тепловоспринимающей поверхности $t = 1450$ °С. Получаем $W_{\text{ид}} = 17$ Вт/см².

Величину реальной мощности W получаем по формуле (2.21):

$$W = 0,87 \cdot 17 = 14,8 \text{ Вт/см}^2.$$

Из табл. 2.10 площадь поверхности рабочей части нагревателя типа ДМ-315/400 $f_{\text{раб}} = 124,2 \text{ см}^2$.

Отсюда мощность рабочей части одного нагревателя согласно формуле (2.22) составит

$$P'_{\text{раб}} = 14,8 \cdot 124,2 \cdot 10^{-3} = 1,85 \text{ кВт.}$$

Для расчета полной мощности нагревателя из табл. 2.10 берем значение развернутой длины рабочей части нагревателя $l_{\text{раб}} = 0,66 \text{ м}$ и длину одного вывода $l_{\text{в}} = 0,4 \text{ м}$; для температуры нагревателя $t_{\text{н}} = 1630 \text{ }^\circ\text{С}$ определяем $\rho'_{\text{раб}} = 3,8 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Тогда согласно формуле (2.23) получим

$$P = 1,85 \left(1 + \frac{0,75 \cdot 0,4}{3,8 \cdot 0,66} \right) = 2,08 \text{ кВт.}$$

Полное сопротивление нагревателя рассчитывается по формуле (2.24):

$$R = 3,54 \cdot 10^{-2} (3,8 \cdot 0,66 + 0,75 \cdot 0,4) = 0,0994 \text{ Ом.}$$

Рабочее напряжение на одном нагревателе вычисляется по формуле (2.25):

$$U = \sqrt{10^3 \cdot 2,08 \cdot 0,0994} = 14,4 \text{ В.}$$

Зная необходимую мощность печи, полученную из теплового расчета, и ориентируясь на значения мощности и напряжения одного нагревателя, можно определить необходимое для работы печи количество нагревателей, подобрать питающий трансформатор и необходимую схему соединения нагревателей.

Типоразмеры карборундовых нагревателей (рис. 2.19) и их характеристики приведены в табл. 2.11. Их рекомендуется применять для печей с рабочей температурой 1300–1350 $^\circ\text{С}$.

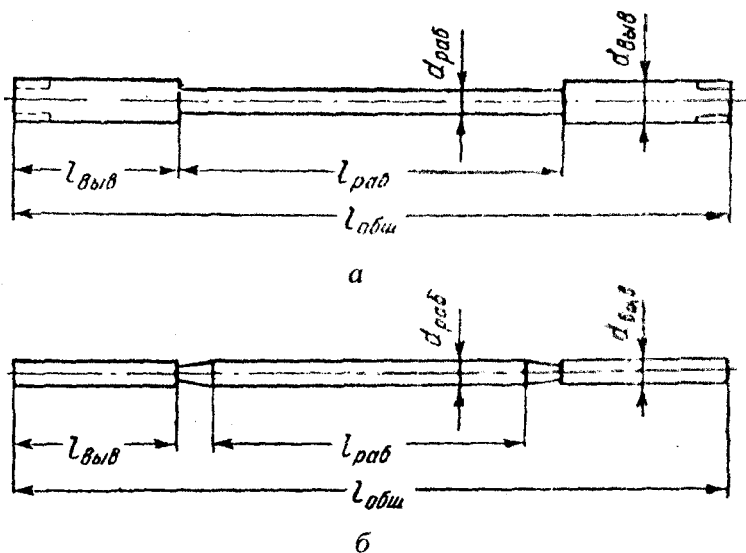


Рис. 2.19. Эскизы карборундовых нагревателей:
 а – цельный нагреватель типа КНМ; б – составной нагреватель типа КНС

Таблица 2.11

Карборундовые нагреватели, выпускаемые Подольским заводом
 огнеупорных изделий

Назначение нагревателей	Тип нагревателя	Размеры, мм				Площадь поверхности рабочей части, см ²	Полное сопротивле- ние в нагре- том состоя- нии, Ом
		длина рабочей части	общая длина	диаметр рабочей части	диаметр вывода		
1	2	3	4	5	6	7	8
Промышлен- ные	КНС-25/406	300	406	25	–	236	0,77–1,75
	КНС-25/440	300	1 120	25	25	236	1,1–1,55
	КНС-25/540	400	1 220	25	25	314	1,2–1,8
	КНС-32/711	560	711	32	–	564	1,1–2,8
	КНМВ-25/640	400	640	25	–	314	1,1–2,0

1	2	3	4	5	6	7	8
Лабораторные	КНМ-8×100×270	100	270	8	14	25,1	1,0-2,0
	КНМ-8×150×270	150	270	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8×150×320	150	320	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8×150×450	150	420	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8×180×300	180	300	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8×180×350	180	350	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8×180×400	180	400	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8×180×480	180	480	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8×200×500	200	500	8	14	50,2	2,0-4,0
	КНМ-8×250×450	250	450	8	14	62,8	2,5-5,0
	КНМ-12×250×750	250	750	12	18	94,2	1,5-3,0
	КНМ-14×300×250	300	800	14	23	132	1,75-3,5
	КНЛ-12/280	200	280	12	—	75,4	4,4-9,0
	КНЛ-12/320	230	320	12	—	86,5	4,5-9,0
	КНЛ-16/320	230	320	16	—	115	4,5-9,0
Трубчатый спиральный ТН-55/40×200×75	200	350	55/40	55	327	1,0-2,8	

Примечания:

1. Нагреватели марки КНС-25/540 комплектуются по 12 шт. КНС-25/406, КНС-25/440, КНС-32/711 – по 3, 4, 6 шт. с отклонением по сопротивлению не более 4 %.

2. Выпускаются также две группы нагревателей марки КНС-25/540 вне ТУ:

- низкого удельного сопротивления $R = 1,1-1,2$ Ом;
- высокого удельного сопротивления $R = 1,8-1,2$ Ом.

3. Обозначения нагревателей:

КНС-25/540 – карборундовый нагреватель составной, 25 – диаметр рабочей части, 540 – длина рабочей части и металлизированных концов;

КНМ-8×180×400 – карборундовый нагреватель из мелкозернистых масс, 8 – диаметр рабочей части, 180 – длина рабочей части, 400 – общая длина;

КНМВ-25/640 – карборундовый нагреватель с приваренными выводными концами, 25 – диаметр рабочей части, 640 – общая длина;

КНЛ-16/320 – карборундовый нагреватель, 16 – диаметр рабочей части, 320 – общая длина.

Расчет карборундовых нагревателей производится аналогично расчету нагревателей ДМ. Допустимая удельная поверхностная мощность определяется так же, как в случае расчета печей с металлическими нагревателями. При этом коэффициент эффективности излучения принимают $\alpha_{\text{ф}} \approx 0,68$.

Мощность P одного нагревателя рассчитывается по формуле (2.22).

Небольшой дополнительной мощностью (1–10 %), выделяемой в токопроводах, можно пренебречь. Это тем более допустимо, что в тепловом расчете выводятся неучтенные потери, а вся энергия, выделяемая выводами в кладке, частично компенсирует эти потери.

Напряжение для одного нагревателя рассчитывается по формуле (2.25).

Из табл. 2.11 видно, что исходное сопротивление выпускаемых нагревателей колеблется в широких пределах. Кроме того, в процессе работы оно очень сильно возрастает. Из этого следует, что после определения допустимой удельной поверхностной мощности главной задачей является расчет ступеней напряжения питающего трансформатора таким образом, чтобы при переключении ступеней напряжения в процессе старения мощность печи не превышала бы допустимую и не была ниже заданной. Для определения по формуле (2.25) наиболее низкого напряжения для питания одного нагревателя сопротивление нагревателя выбирается из табл. 2.11, причем берется низшее его значение. Для расчета наивысшего напряжения сопротивление выбирается по верхнему пределу и увеличивается примерно в 2,5–3 раза; этим учитывается ряд факторов: старение нагревателя, возможное падение напряжения питающей сети во время работы печи, выделение мощности в выводах нагревателей.

Определив по заданной установленной мощности печи и по мощности одного нагревателя количество нагревателей, выбирают схему включения и, ориентируясь на напряжения, необходимые для питания одного нагревателя, определяют значения напряжений верхней и нижней ступеней питающего трансформатора. Затем следует установить необходимые промежуточные ступени напряжения трансформатора.

Подсчет количества силовых стержней производят по формуле

$$n = \frac{P}{p},$$

где P – номинальная мощность печи, кВт;

p – мощность одного силового стержня, кВт.

Мощность одного силового стержня можно подсчитать, если известны подводимое напряжение и сопротивление стержня.

Таблица 2.12

Диаметр и длина рабочей части стержня	18×250	18×300	18×500	25×300	30×1000
Сопrotивление при 1400 °С, Ом	1,3	1,7	2,7	1,0	2,1

Пример. Расчет карборундового нагревателя.

Исходные данные:

- 1) температура нагреваемого изделия 1 300 °С;
- 2) степень черноты поверхности $\varepsilon = 0,7$;
- 3) применяется нагреватель типа КНС-540/25;
- 4) отношение шага нагревателей к их диаметру равно трем;
- 5) регулирование печи – двухпозиционное.

Для $\varepsilon = 0,7$ имеем $\alpha_c = 0,9$; для отношения шага к диаметру, равного трем, $\alpha_r = 1,05$. Температуре печи, равной 1300 °С, соответствует допустимая температура нагревателя 1470 °С. Определяем $W_{ид}$ принимая температуру тепловоспринимающей поверхности равной 1300 °С:

$$W_{ид} = 12,5 \text{ Вт/см}^2.$$

Величину реальной мощности W определяем по формуле (2.21):

$$W = 0,68 \cdot 1,05 \cdot 0,9 \cdot 12,5 = 8,00 \text{ Вт/см}^2.$$

Из табл. 2.11 площадь поверхности рабочей части нагревателя КНС-25/540 составляет 314 см².

По формуле (2.22) определяем мощность одного нагревателя:

$$P = 10^3 \cdot 8,00 \cdot 314 = 2,52 \text{ кВт}.$$

Для выделения на новом нагревателе мощности, равной 2,52 кВт, в случае применения комплекта нагревателей с минимальным сопротивлением ($R = 1,2$ Ом) по формуле (2.25) определяем необходимое напряжение:

$$U_{мин} = \sqrt{10^3 \cdot 2,52 \cdot 1,2} = 55 \text{ В},$$

а в случае применения комплекта с максимальным сопротивлением ($R = 1,8 \text{ Ом}$):

$$U_{\text{макс}} = \sqrt{10^3 \cdot 2,52 \cdot 1,8} = 67,5 \text{ В.}$$

В случае использования нагревателей высокого и низкого сопротивления (изготавливаемых вне технических условий) необходимые напряжения будут соответственно

$$U_{\text{мин}} = \sqrt{10^3 \cdot 2,52 \cdot 1,1} = 52,6 \text{ В;}$$

$$U_{\text{макс}} = \sqrt{10^3 \cdot 2,52 \cdot 2} = 71 \text{ В.}$$

Поскольку в процессе старения сопротивление нагревателей увеличивается, то в случае использования нагревателей, соответствующих техническим условиям, напряжение, подаваемое на нагреватель, в процессе эксплуатации нужно будет повышать. Согласно вышеуказанным рекомендациям максимальное напряжение, которое должен обеспечить трансформатор, должно быть в 2,5–3 раза выше начального. За начальное целесообразно принять большее напряжение, соответствующее нагревателям с наибольшим сопротивлением. Получаем

$$U_{\text{макс}} = (2,5 - 3) \cdot 71 = 180 \text{--} 213 \text{ В.}$$

Таким образом, трансформатор должен иметь ступень, обеспечивающую на одном новом нагревателе напряжение порядка 52 В, а для заканчивающих свой срок службы нагревателей высокого сопротивления – ступень напряжения порядка 215 В. Если все нагреватели будут включены параллельно, то трансформатор должен иметь следующие ступени напряжения:

1-й вариант (коэффициент увеличения 1,1):

52–57–63–69–76–84–92–101–111–122–134–147–162–178–196–216, всего 16 ступеней.

2-й вариант (коэффициент увеличения 1,15):

52–60–69–79–91–105–121–139–160–184–212, всего 11 ступеней.

2.6. Особенности расчета электрических методических печей

В отличие от печей сопротивления периодического действия, в которых температуры в различных точках рабочей камеры должны быть одинаковыми, а температура каждой точки меняется во времени, в методических печах температура точки остается неизменной во времени, но зато меняется температура изделий по длине печи.

При наличии нескольких тепловых зон в методической печи длины отдельных зон могут быть и одинаковыми и различными, в основном они выбираются из конструктивных соображений, желательна лишь, чтобы эти зоны были не очень велики (1,5–2,5 м для горизонтальной печи, 1–1,5 м – для вертикальной) и их длины не сильно различались.

Когда задана кривая нагрева изделий во времени и, следовательно, суммарное время пребывания изделий в печи, определение длины печи L не представляет затруднений, так как последняя связана с временем нагрева τ соотношением

$$L = E\tau/g, \quad (2.26)$$

где E – заданная производительность печи;

g – погонная загрузка.

Значение g выбирается из конструктивных соображений; с другой стороны, оптимальное значение загрузки должно, по-видимому, соответствовать минимальной длине печи, однако определить это оптимальное значение можно, лишь рассчитав несколько вариантов. Если длина печи определена, то ее можно разбить на зоны (если нет каких-либо специальных соображений, то можно брать зоны одинаковой длины), исходя из рекомендованных выше длин. По кривой нагрева для начала и конца каждой зоны определяют температуры изделий и по ним удельные тепловые потоки зон $q_{п}$:

для загрузки в форме плиты

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho S}{q_{пз}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}); \quad (2.27)$$

для загрузки в форме цилиндра

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho R}{2q_{\text{пз}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}), \quad (2.28)$$

где $\tau_{\text{зоны}}$ — время нагрева изделия в данной зоне;

$q_{\text{пз}}$ — постоянный тепловой поток рассматриваемой зоны.

$t_{\text{нач.пов.изд}}$ — температура изделий в начале зоны;

$t_{\text{кон.пов.изд}}$ — температура изделий в конце зоны.

Выражения (2.27) и (2.28) действительны для всех зон, кроме первой, для нее должно быть учтено время начального периода нагрева τ' , вследствие чего будем иметь соответственно

$$\tau_{\text{зоны}_1} = \frac{c\rho S}{q_{\text{пз1}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}) + 0,3 \frac{S^2}{a}; \quad (2.29)$$

$$\tau_{\text{зоны}_1} = \frac{c\rho R}{2q_{\text{пз1}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}) + 0,25 \frac{R^2}{a}. \quad (2.30)$$

Полученные по формулам (2.29), (2.30) значения $q_{\text{п}}$ должны быть проверены с точки зрения допустимых температур печей:

$$q_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}^{\text{м}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.31)$$

где $T_{\text{печи}}$ — максимально допустимая с точки зрения стойкости нагревателей температура печи;

$T_{\text{изд}}^{\text{м}}$ — температура нагрева поверхности изделий в конце данной зоны.

Как уже указывалось выше, эта температура является средней из температур всех участвующих в облучении изделий поверхностей нагревателей, стен камеры печи, жароупорных деталей и т.п., при предварительных расчетах она может приниматься на 50 °С меньше значений, рекомендуемых для нагревателей температур.

Когда кривая нагрева не задана, ее строят исходя из возможного приближения к оптимальной кривой, соответствующей нагреву при

$t_{\text{печи}} = \text{const}$. Для этой цели, задаваясь длиной зон в 1,5–2,5 м и из формулы (2.26) определяя соответствующее время пребывания изделий в каждой зоне τ , из формулы (2.31) находим удельный тепловой поток последней зоны, для которой известна температура изделий (конечная). Из формул (2.27) и (2.28) можно определить температуру поверхности изделий в начале последней зоны или, что то же самое, в конце предыдущей зоны, а это, в свою очередь, позволит найти удельный тепловой поток этой зоны q_n . Действуя таким образом, получаем температуры изделий в каждой зоне и, дойдя до начальной температуры их нагрева, тем самым определяем длину печи и строим кривую нагрева изделий. Если число зон получится дробным, то надо скорректировать их длины в ту или иную сторону, а затем повторить расчет от последней зоны и получить температуры изделий в начале и в конце каждой зоны и значения удельных тепловых потоков в этих зонах. Получив для каждой зоны значения времени пребывания в ней изделий τ и ее длину, можно по формуле (2.26) уточнить производительность печи или загрузку на 1 м длины печи.

В тех случаях когда задана максимально допустимая скорость нагрева изделий V_n , °С/ч, значение максимального удельного теплового потока q_n не должно превосходить значений

$$q_n = c\rho SV_n$$

для пластины и

$$q_n = 0,5c\rho RV_n$$

для цилиндра.

Обычно $V_{\text{макс}}$ задается для первой зоны, так как в ней она имеет наибольшее значение.

Если задан максимальный допустимый перепад температур в изделии Δt , то максимальный удельный тепловой поток не должен быть больше чем

$$q_n = 2\lambda\Delta t/S$$

для пластины и

$$q_n = 2\lambda\Delta t/R$$

для цилиндра.

Обычно $\Delta t_{\text{макс}}$ задается для последней зоны.

В некоторых случаях бывает целесообразно обеспечить не равные длины зоны, а равную их мощность при различной длине. В этом случае первая зона будет наиболее короткой, а последняя наиболее длинной. Преимуществом зон с равной мощностью является возможность применения в них нагревателей одного сечения (очевидно, шаг нагревателей будет различным в различных зонах), одинаковых кабелей и аппаратов, как коммутационных, так и измерительных.

При зонах равной мощности будем иметь

$$q'_n L' = q''_n L'' = q'''_n L''' = \dots = P_{\text{пол}} / nb,$$

где n – число зон;

$P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, воспринимаемая изделиями;

b – ширина слоя изделий.

К последней зоне (зоне выдержки) изделия подходят с определенным внутренним температурным перепадом Δt . Если по технологическому процессу не нужно, чтобы в нагретом материале проходили требующие известного времени реакции или превращения (это время должно быть задано технологами), то время пребывания изделий в зоне выдержки определяется временем выравнивания в них температур, временем снижения внутреннего температурного перепада до заданного значения $\Delta t_{\text{зад}}$.

Выравнивание температур может происходить двояким способом – с введением в изделие дополнительного тепла или за счет накопленного тепла в нем самом. В первом случае температура поверхности изделия доводится к началу зоны выдержки до заданного значения $t_{\text{зад}}$, а температура его центра остается ниже заданной $t_{\text{зад}} - \Delta t$; в зоне выдержки к нему подводится некоторое количество тепла, необходимое для того, чтобы довести среднюю температуру изделия до $t_{\text{зад}}$, в то время как температура поверхности изделия остается неизменной (это обеспечивается соответствующим подбором температурного задания терморегулятора). Во втором случае поверхность изделия к началу зоны выдержки перегревается на $2/3 \Delta t_{\text{зад}}$ (для пластины) или $0,5 \Delta t_{\text{зад}}$ (для цилиндра), подвод тепла в зоне выдержки к изделию прекращается (соответствующим подбором мощности зоны, выбираемой равной тепловым потерям зоны) и выравнивание температур осуществляется путем снижения температуры поверхности изделия при одновременном повышении температуры его центра.

В обоих этих случаях протекание процесса практически обуславливается лишь критерием Фурье, благодаря чему расчет времени выравнивания очень упрощается (рис. 2.20 и 2.21).

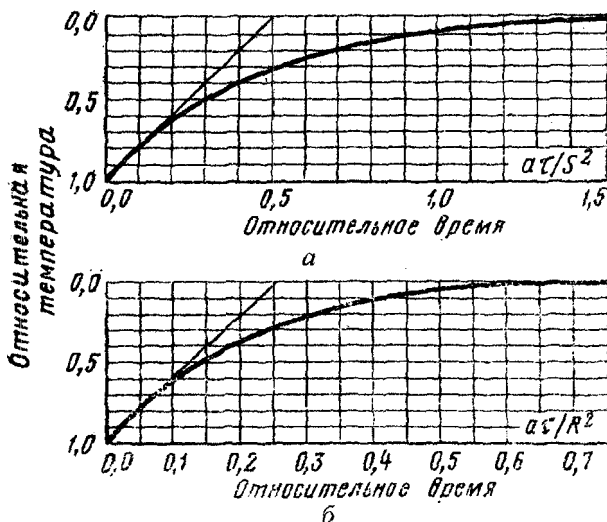


Рис. 2.20. График выравнивания температур при $t_{\text{пов}} = \text{const}$:
 а – в средней плоскости пластины толщиной $2S$; б – на оси цилиндра радиуса R

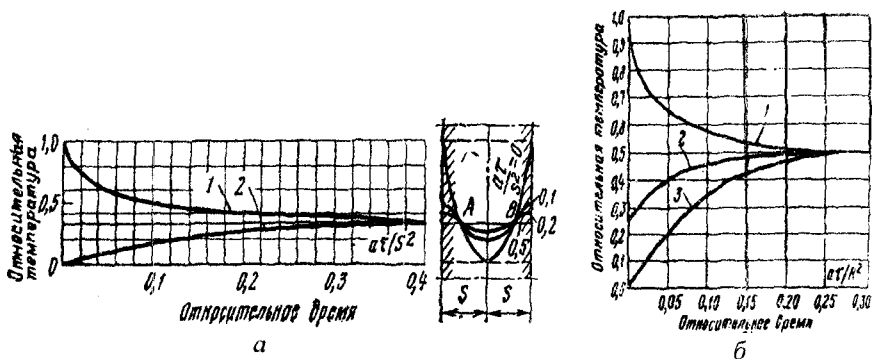


Рис. 2.21. График выравнивания температур при нулевом тепловом потоке через поверхность:

а – в пластине: 1 – температура наружной поверхности; 2 – температура средней плоскости; б – в цилиндре: 1 – температура поверхности ($r = R$); 2 – температура цилиндра при $r = 0,5R$; 3 – температура оси ($r = 0$)

Так как в методических печах температуры нагревателей в разных зонах могут быть неодинаковы, то и тепловые потери печи следует подсчитывать по средним температурам зон (или средней температуре печи, если разница в температурах зон невелика). Определяют их так же, как и для печей периодического действия.

Энергетический баланс методической печи следует составлять для периода времени, равного 1 ч. Так как температуры отдельных точек печи во времени не меняются, никакого накапливания или потери тепла в самой печи не может быть. Поэтому полный расход тепла за 1 ч работы печи

$$q = q_{\text{пол}} + q_{\text{всп}} + q_{\text{пот}} = cE(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) + c'B(t''_{\text{всп}} - t'_{\text{всп}}) + q_{\text{пот}},$$

где E – производительность печи;

c – удельная теплоемкость садки;

$t''_{\text{изд}}$ и $t'_{\text{изд}}$ – температуры садки в конце и в начале нагрева;

c' – удельная теплоемкость тары (или газа);

B – масса тары (или газа), отнесенная к единице времени;

$t''_{\text{всп}}$ и $t'_{\text{всп}}$ – температуры тары (газа) в конце и начале нагрева;

$q_{\text{пот}}$ – суммарные тепловые потери печи.

Удельный расход энергии

$$A = \frac{q}{E} = \left[c(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) + c' \frac{B}{E} (t''_{\text{всп}} - t'_{\text{всп}}) + \frac{q_{\text{пот}}}{E} \right].$$

Тепловой КПД печи

$$\eta_{\tau} = \frac{q_{\text{пол}}}{q_{\text{пол}} + q_{\text{всп}} + q_{\text{пот}}}.$$

Мощность печи должна определяться по зонам:

$$P_{\text{зоны}} = K \left[q_{\text{пз}} F_{\text{изд.з}} + c'B(t''_{\text{всп.з}} - t'_{\text{всп.з}}) + q_{\text{пот.з}} \right],$$

где K – коэффициент запаса, может быть принят равным 1,1–1,2, он учитывается по тем же соображениям, что и у печей периодического действия;

$q_{пз}$ – удельный тепловой поток данной зоны;

$F_{изд.з}$ – воспринимающая тепло поверхность изделий в зоне;

c и B – удельная теплоемкость и масса тары;

$t''_{всп.з}$ и $t'_{всп.з}$ – температуры нагрева тары в конце и начале зоны,

которые могут быть приняты равными соответствующим температурам изделий в зоне $t''_{изд.з}$ и $t'_{изд.з}$;

$q_{пот.з}$ – суммарные тепловые потери зоны.

Следует отметить, что иногда мощность последних зон получается очень малой, и ее увеличивают против расчетной из соображений более быстрого прогрева зон при пуске в ход холодной печи.

Пример. Спроектировать конвейерную печь для нагрева колец для шарикоподшипников под закалку до 850 ± 10 °С производительностью 700 кг/ч. Материал – шарикоподшипниковая сталь, $c_{0-850} = 0,67 \cdot 10^3$ Дж/(м·°С); насыпная плотность нагрузки 2 000 кг/м³, ее теплопроводность (в засыпке) 14 Вт/(м·°С). Ширина конвейера 600 мм, высота слоя колец 60 мм, нагрев – односторонний, начальная температура изделий 20 °С.

Максимальную температуру в печи принимаем равной 900 °С (максимальная температура нагревателей около 950 °С) и приступаем к определению ее длины и кривой нагрева изделий, принимая длину зон равной 2 м.

Удельный тепловой поток в конце печи в соответствии с формулой (2.31)

$$q_{п} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} \left[\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{850 + 273}{100} \right)^4 \right] =$$
$$= 3,84(18\,900 - 15\,900) = 11\,520 \text{ Вт/м}^2.$$

Время нагрева изделий на пути длиной 2 м определяется из формулы (2.26):

$$\tau = \frac{Lg}{E} = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 0,06 \cdot 2\,000}{700} = 0,206 \text{ ч.}$$

Из формулы (2.27) находим температуру изделий в начале участка:

$$t'_{\text{пов.изд}} = t''_{\text{пов.изд}} - \frac{\tau q_{\text{п}}}{\text{ср}S} = 850 - \frac{0,206 \cdot 11\,520 \cdot 3\,600}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 850 - 106 = 744 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для второго участка будем иметь

$$q_{\text{п}} = 3,84 \left[18\,900 - \left(\frac{744 + 273}{100} \right)^4 \right] = 3,84(18\,900 - 10\,700) = 31\,500 \text{ Вт/м}^2.$$

$$t'_{\text{пов.изд}} = 744 - \frac{0,206 \cdot 31\,500 \cdot 3\,600}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 744 - 219 = 453 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для третьего участка соответственно

$$q_{\text{п}} = 3,84 \left[18\,900 - \left(\frac{453 + 273}{100} \right)^4 \right] = 3,84(18\,900 - 2\,780) = 61\,908 \text{ Вт/м}^2.$$

Полученное значение потока $q_{\text{п}}$ чересчур велико, оно должно быть меньше, чем можно получить с 1 м^2 стены, без того чтобы перегреть нагреватели. Для предварительных расчетов значения $q_{\text{п max}}$ могут быть взяты из табл. 2.13.

Таблица 2.13

Значения полезного теплового потока $q_{\text{п max}}$
при нагреве различных материалов, Вт/м²

Расчетная температура, °C	Сталь	Медь	Латунь	Сталь в защитной атмосфере	Алюминий
800	25600	23300	19600	15400	10500
900	36000	32000	28000	22000	15000
1000	55800	44200	38700	30500	20700
1100	67500	59900	52300	41300	28100
1200	89600	79700	69800	54800	—
1300	116300	—	—	71200	—
1400	165100	—	—	91100	—
1500	207000	—	—	114900	—

Тепловой поток $q_n \text{ max}$ зависит от температуры, которую можно допустить на нагревателе в работе, и от физических свойств ($C_{пр}$) нагреваемого тела. Значение $q_n \text{ max}$ должно быть проверено при расчете нагревателя.

Из табл. 2.13 выбираем

$$q_n \text{ max} = 36\,000 \text{ Вт/м}^2 \text{ (сталь, } t_{\text{печи}} = 900 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

Тогда для третьего участка получим

$$t'_{\text{пов.изд}} = 453 - \frac{0,177 \cdot 3\,600 \cdot 36\,000}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 453 - 285 = 168 \text{ }^\circ\text{C};$$

здесь в соответствии с формулами (2.28), (2.29), где

$$\tau_{\text{зоны}} = 0,206 - 0,3 \frac{0,06^2}{10,46 \cdot 10^{-6} \cdot 3\,600} = 0,206 - 0,029 = 0,177;$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{14,0}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000} = 10,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для того чтобы получить точное решение, увеличиваем длину зон до 2,3 м. Тогда будем иметь

$$\tau_3 = \frac{2,3 \cdot 0,6 \cdot 0,06 \cdot 2\,000}{700} = 0,237 \text{ ч}.$$

Для третьей, конечной, зоны $q_n = 11\,520 \text{ Вт/м}^2$;

$$t'_{\text{пов.изд}} = 850 - \frac{0,237 \cdot 11\,520 \cdot 3\,600}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 850 - 122 = 728 \text{ }^\circ\text{C};$$

вторая зона

$$q_n = 3,84 \left[18\,900 - \left(\frac{728 + 273}{100} \right)^4 \right] = 3,84(18\,900 - 10\,040) = 34\,000 \text{ Вт/м}^2.$$

$$t'_{\text{пов}} = 728 - \frac{0,237 \cdot 34\,000 \cdot 3\,600}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 728 - 361 = 367 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Первая, начальная зона будет иметь $q_n = q_{n \text{ max}} = 36\,000 \text{ Вт/м}^2$.

$$t'_{\text{пов}} = 367 - \frac{(0,237 - 0,029) \cdot 36\,000 \cdot 3\,600}{0,67 \cdot 10^3 \cdot 2\,000 \cdot 0,06} = 367 - 335 = 32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Мы достаточно близко подошли к начальной температуре изделия $20 \text{ }^\circ\text{C}$; следовательно, можно окончательно принять, что печь будет иметь три зоны нагрева длиной по $2,3 \text{ м}$.

Температурные перепады в изделии:

первая зона

$$\Delta t_1 = \frac{q_n S}{2\lambda} = \frac{36\,000 \cdot 0,06}{2 \cdot 14,0} = 77 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t''_{\text{ц.изд}} = 367 - 77 = 290 \text{ }^\circ\text{C};$$

вторая зона

$$\Delta t_2 = \frac{34\,000 \cdot 0,06}{2 \cdot 14,0} = 73 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t''_{\text{ц.изд}} = 728 - 73 = 655 \text{ }^\circ\text{C};$$

третья зона

$$\Delta t_3 = \frac{11\,520 \cdot 0,06}{2 \cdot 14,0} = 25 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t''_{\text{ц.изд}} = 850 - 25 = 825 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температуры печи в начале и конце первой зоны

$$t'_{п1} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{п1}}{3,84} + \left(\frac{T'_{изд}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \sqrt[4]{\frac{36\,000}{3,84} + \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4} - 273 =$$

$$= 986 - 273 = 713 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t''_{п1} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{п1}}{3,84} + \left(\frac{T'_{изд}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \sqrt[4]{\frac{36\,000}{3,84} + \left(\frac{367 + 273}{100}\right)^4} - 273 =$$

$$= 1\,025 - 273 = 752 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура печи в начале и конце второй зоны

$$t'_{п2} = 100 \sqrt[4]{\frac{34\,000}{3,84} + \left(\frac{367 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1\,013 - 273 = 740 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t''_{п2} = 100 \sqrt[4]{\frac{34\,000}{3,84} + \left(\frac{728 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1\,172 - 273 = 899 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура печи в начале и конце третьей зоны.

$$t'_{п3} = 100 \sqrt[4]{\frac{11\,520}{3,84} + \left(\frac{728 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1\,069 - 273 = 796 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t''_{п3} = 100 \sqrt[4]{\frac{11\,520}{3,84} + \left(\frac{850 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1\,173 - 273 = 900 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определяем длину зоны выдержки. У ее начала имеем $t_{пов.изд} = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $t_{ц.изд} = 825 \text{ } ^\circ\text{C}$ при температурном перепаде в изделии $25 \text{ } ^\circ\text{C}$. По заданию этот перепад надо свести к $10 \text{ } ^\circ\text{C}$, т. е. до $10/25 = 0,4$ начального значения. По графику Г.П. Иванцова (см. рис. 2.20) для

бесконечной пластины при относительном температурном перепаде 0,4 относительное время

$$\alpha\tau/S^2 = 0,42,$$

откуда

$$\tau_{\text{выд}} = \frac{0,42 \cdot 0,06^2}{10,45 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 0,04 \text{ ч.}$$

Этому времени соответствует длина зоны выдержки

$$L_{\text{выд}} = 0,04 \frac{700}{0,6 \cdot 0,06 \cdot 2000} = 0,39 \text{ м.}$$

Практически длина зоны выдержки с учетом необходимости размещения заднего барабана конвейера и желоба для сбрасывания колец в масляном баке должна быть принята приблизительно равной 1 м.

Таким образом, полная длина зон печи окажется равной 7,9 м, время пребывания колец в печи – около 0,815 ч.

Характеристики всех зон печи и кривые изменения температур вдоль ее рабочего пространства даны на рис. 2.22.

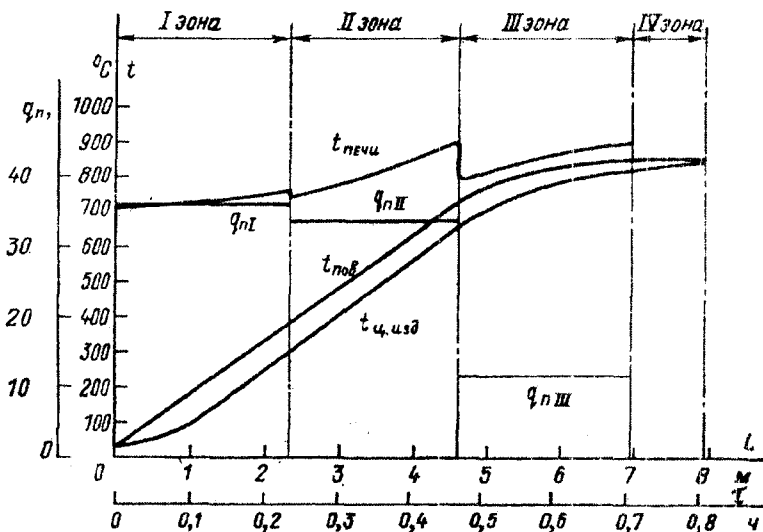


Рис. 2.22. Температурный график к числовому примеру расчета методической печи (тепловой поток q_n измеряется в kW/m^2)

2.7. Автоматическое регулирование температурного режима электропечей сопротивления

При автоматическом регулировании температурного режима электропечей сопротивления поддержание заданной температуры рабочего пространства электропечи осуществляется путем изменения количества потребляемой ее электроэнергии, что может быть достигнуто плавным или ступенчатым изменением мощности электропечи.

Автоматическое регулирование температуры в электропечах сопротивления достигается применением релейных двух- и трехпозиционных регуляторов, режеле импульсных и регуляторов непрерывного действия. Применение регуляторов непрерывного действия, обеспечивающих высокую точность заданной температуры путем плавного регулирования подводимой мощности, целесообразно лишь применительно к малоинерционным печам, к электропечах, в которых необходимо регулирование температуры по строго заданной программе и в случаях осуществления скоростных методов нагрева, когда используются большие удельные мощности.

Подробнее этот вопрос изложен в специальной литературе.

3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

В электрических печах сопротивления прямого действия тепловая энергия электрического тока выделяется практически в каждом элементарном объеме нагреваемого тела (заготовки или детали), через которое с помощью токоподводящих контактов пропускается электрический ток промышленной частоты. Непременное наличие последних предопределило название этого способа нагрева – *электроконтактный нагрев*.

Элементами электроконтактного нагревательного устройства являются: источник тока, токоподводящие провода, токоподводящие зажимные контакты, межпозиционные или межконтактные переключки и силовой трансформатор (рис. 3.1). Применение трансформаторов в электроконтактных установках позволяет сравнительно просто регулировать и получать требуемые напряжения на нагреваемых заготовках или деталях при довольно больших значениях силы тока в них.

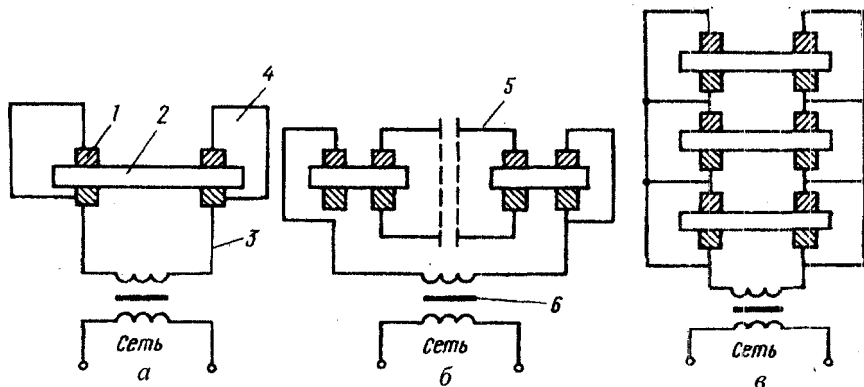


Рис. 3.1. Принципиальные электрические схемы однопозиционного (а) и многопозиционного устройства с последовательным (б) и параллельным (в) включением нагревательных позиций (заготовок) в нагревательную цепь:

1 – зажимной токопроводящий контакт; 2 – нагреваемая заготовка; 3 – токоподводящий провод (шина); 4 – межконтактная перемычка; 5 – межпозиционная перемычка; 6 – силовой трансформатор

В качестве источников питания могут быть использованы источники постоянного и переменного тока промышленной и повышенной частоты. При нагреве постоянным током улучшается равномерность нагрева, однако ограничивается возможность получения постоянного тока большой силы.

При использовании тока повышенной или высокой частоты в заготовке индуктируются вихревые токи, что позволяет осуществить комбинацию электроконтактного нагрева с индукционным. Однако это тоже удорожает и усложняет установку.

3.1. Техническая характеристика и конструкция электроконтактных нагревательных установок

В настоящее время в промышленной практике известно много разновидностей электронагревательных установок как по конструктивному исполнению, технологическому назначению, так и по электрическим схемам включения нагреваемых заготовок во вторичную электрическую цепь.

Техническая характеристика наиболее широко применяемых электроконтактных установок для нагрева заготовок под ковку, штамповку, высадку и закладку приведена в табл. 3.1 [4].

Характеристика электронагревательных установок

Наименование параметров	Тип установки						
	К-8	К-13	АК-1	К-16	К-11м	К-25	К-26
1	2	3	4	5	6	7	8
Трансформаторы: тип	—	Стержневой	Броневой				—
мощность, кВА	15×2	200	150	300	30	200	200
повторно-кратковременный режим, %	60	75	75	90	75	75	80
напряжение вторичное, В	1–1,26	5,6–13,8	8,1–13,6	5,6–12,6	4,3–6,9	41,6–66,4	29,8–47,6
Размер нагреваемых заготовок, мм:							
диаметр	—	20–45	20–42	45–75	10–20	10–20	10–20
длина	—	300–650	400–650	230–600	250	3000–3600*	
Давление контактов, Н	50	1800–1900	3000	4500	200	900	900
Расход электроэнергии на нагрев до 1200 °С, кВт·ч/1 м	—	325	325	440–300**	—	—	—
КПД	0,65	0,745	0,745	0,53–0,78**	0,75	0,80	—
cos φ	—	0,8	0,8	0,73–0,90	0,80	0,95	0,90
Высота от пола до места загрузки, мм:							
высота	1800	1360	1650	1760	1100	1320	1120
ширина	650	980	1100	1000	610	670	760
длина	780	1950	2150	1750	780	3700	1430
Вес установки, кг		3000	2500	4000	500	1000	1000

* Пружинный длиной 250–350 мм, внутренний диаметр 80–120 мм.
 ** Удельный расход электроэнергии, величина КПД установки измеряются в зависимости от соотношения $l : d^2$, и значение этих показателей тем лучше, чем больше данное отношение.

У всех установок первичное напряжение 380 В, количество ступеней напряжения шесть, за исключением установки К-8, у которой их восемь, частота применяемого переменного тока 50 Гц, род тока – однофазный, система охлаждения трансформаторов водяная (у ус-

тановки К-8 воздушная), у контактодержателей также водяная. расход охлаждающей воды составляет 540-600 л/ч.

Система контроля температуры нагреваемых заготовок автоматическая с помощью фотоэлектронного реле типа ФЭП-2 ГАЗ.

Привод контактных зажимных головок пневматический, давление воздуха 5 ат.

Рассмотрим более подробно конструкцию электроконтактной нагревательной установки К-16, предназначенной для нагрева заготовки диаметром до 75 мм и длиной от 230 до 600 мм.

Электронагревательная установка К-16 (рис. 3.2) состоит из силового однофазного трансформатора 1 броневого типа мощностью 300 кВт, смонтированного на нижней раме каркаса. К вторичным виткам 2 трансформатора присоединяются контактные зажимные головки – передняя 7 и задняя 9. Задняя контактная зажимная головка крепится жестко и соединяется непосредственно с витками. Передняя подвижная зажимная головка соединяется со вторичными витками посредством гибких переходных шин 6, набранных из медных тонких полос. Обе зажимные головки смонтированы на алюминиевых плитах. Плита 10 задней зажимной головки изолирована от каркаса при помощи текстолитовых прокладок и крепится жестко к нему. Плита 5 передней зажимной головки смонтирована на кронштейнах 3, которые при помощи осей, закрепленных в нижней раме каркаса, могут поворачиваться, при этом расстояние между кронштейнами изменяется в соответствии с удлинением нагреваемой заготовки. После окончания нагрева заготовки плита с подвижной зажимной головкой возвращается в исходное положение посредством пружинящего упора 4.

Каждая контактная зажимная головка состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижные контактодержатели соединены болтами с медным бруском, вмонтированным в алюминиевые плиты. Через медные бруски напряжение подается на нагреваемую заготовку. Подвижный контактодержатель 21 укреплен на массивном штоке 20. Привод подвижной части контактных зажимных головок пневматический и смонтирован в алюминиевом кронштейне 17 коробчатого сечения. Шток, на котором укреплен подвижный контактодержатель, посредством рычага 16 (с отношением плеч 1 : 3) соединен с пневматическим цилиндром 11 двойного действия диаметром 200 мм. Нижняя крышка цилиндра шарнирно укреплена в кронштейне. Таким образом, подвижные контактодержатели зажимают заготовку в контак-

тах с усилием 45 000 Н. Для разгрузки кронштейна 17 и болтов от столь значительного усилия он дополнительно соединен с плитой 5 стальным стяжным болтом 18, который воспринимает на себя основную нагрузку при зажатии заготовки в контактах. Нижний и верхний контактодержатели 21, 22 соединены между собой гибкими медными шинами 19, набранными из тонких полос. Сменные электрические контакты крепятся в контактодержателях при помощи затяжных клиньев 22. Рабочие плоскости контактодержателей охлаждаются проточной водой. В передней нижней части каркаса установки имеется переключатель 25. В зависимости от положения переключателя может быть подведено одно из указанных ниже напряжений:

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6
Напряжение, В	5,6	6,8	8,6	10,3	11,5	12,6

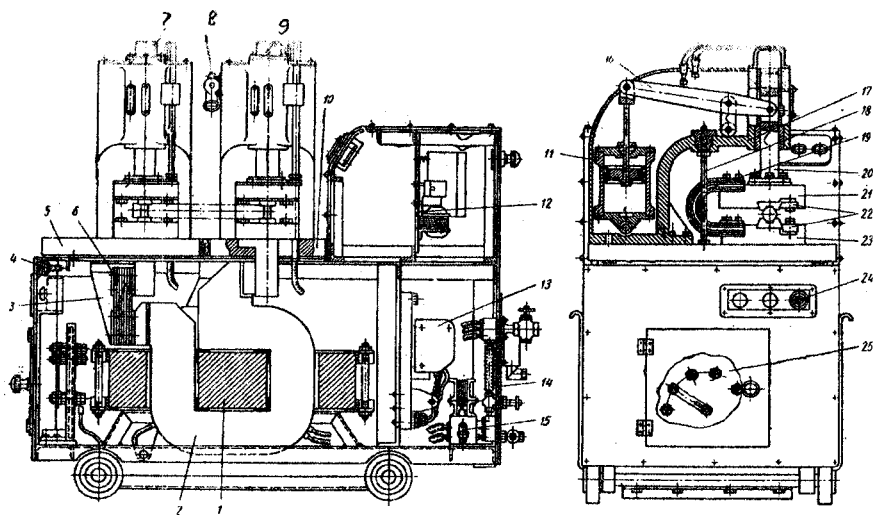


Рис. 3.2. Электронагревательная установка К-16

Контроль температуры нагрева заготовки осуществляется фотоэлектрическим реле ФЭП-2, фотоэлементная головка 8 которого закреплена на кронштейне 17 между двумя контактными зажимными головками. Впереди установки, в правой ее стороне, расположена кнопочная станция управления 24, которая во избежание случайных включений пусковой кнопки утоплена вровень с облицовкой каркаса. В задней нижней части каркаса смонтирован контактор 13, к ко-

тому через плавкие предохранители подается рабочее напряжение 380 В. Рядом с контактором расположен электропневматический клапан 15 двойного действия, предназначенный для управления пневматической системой зажатия заготовки в контурах. Электронагревательная установка питается сжатым воздухом и охлаждающей водой путем присоединения соответствующих шлангов к панели 14, расположенной в задней части каркаса. Схема разводки такая же, как у установки К-13. На электропанели 12 смонтированы все приборы автоматической схемы управления работой установки.

Рациональная компоновка силового трансформатора (максимальное укорочение токонесущих частей) позволила получить на установке К-16 весьма высокий КПД.

В табл. 3.2 приводятся замеры электрических параметров, проведенных во время испытания установки при нагреве заготовок различных диаметров до температуры 1200 °С, и продолжительность их нагрева (рис. 3.3).

Таблица 3.2

Основные электрические параметры установки К-16 при нагреве заготовок до температуры 1200 °С

Диаметр нагреваемой заготовки, мм	Длина заготовки, мм	$\frac{l}{d^2}$	Продолжительность нагрева заготовки, сек	Среднее значение вторичного напряжения, В	Среднее значение первичного напряжения, В	Среднее значение первичного тока, А	Мощность, потребляемая из сети, в кВт	Кажущаяся мощность, кВт	КПД установки, %	Коэффициент мощности cos φ	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг
45	500	2,42	45	7,0	345	470	147	162	78,7	0,809	0,294
45	385	1,9	42	5,4	350	408	124,4	142,8	77,2	0,871	0,302
45	500	2,42	35	8,0	335	681	190	228	78,4	0,834	0,297
52	500	1,8	60	6,6	341	549	157	187	74,5	0,864	0,314
52	390	1,4	55	5,4	353	460,8	131	163	75,1	0,804	0,308
60	230	0,6	60	3,65	357	471	124	168	57,5	0,74	0,405
70	385	0,78	100	4,6	345,4	557,2	144,4	192	60,8	0,759	0,380
70	230	0,46	87	3,64	350	490,7	127	172	53,3	0,732	0,440

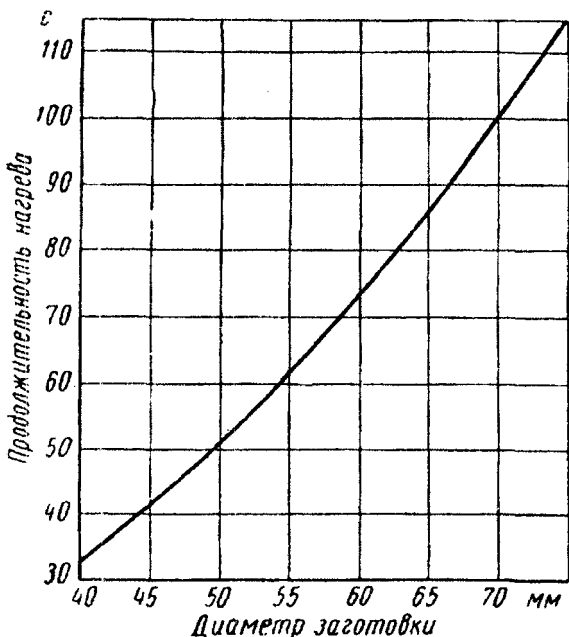


Рис. 3.3. Продолжительность нагрева до 1200 °С кузнечных заготовок различных диаметров при скорости выделения тепла в них 6 ккал/с на 100 мм длины

3.2. Расчет электроконтактных нагревательных установок

Расчет электроконтактного нагревательного устройства заключается в определении:

- времени нагрева заготовок заданного размера и производительности установки;
- коэффициента полезного действия установки;
- параметров, необходимых для подбора силового трансформатора.

3.2.1. Расчет времени нагрева и производительности установок

Время нагрева заготовки и производительность – два тесно связанных производственно-технических показателя всякой электроконтактной нагревательной установки. Обычно задается производительность установки и по ней уточняется время нагрева, а иногда наоборот.

рот – задается время нагрева и тогда уточняется производительность установки. Но в любом случае время нагрева (скорость) должно быть рассчитано или проверено, если оно задано произвольно.

Расчет времени нагрева может быть выполнен двумя способами: расчетным путем и по экспериментальным данным, приводимым в литературных источниках.

В первом случае необходимо воспользоваться уравнением теплового баланса, которое в общем виде можно записать как

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

здесь Q – количество теплоты, выделяемой электрическим током при прохождении по заготовке (детали);

Q_1 – тепло, затраченное на нагрев заготовки (детали);

Q_2 – тепловые потери в окружающее пространство.

$$Q = I_{\text{ср}}^2 R_3 \tau, \quad Q_1 = cG(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad Q_2 = q_{\Sigma} F \tau.$$

Решая уравнение теплового баланса относительно времени нагрева, получим

$$\tau = \frac{cG(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})}{I_{\text{ср}}^2 R - q_{\Sigma} F}, \quad (3.1)$$

где q_{Σ} – суммарные тепловые потери с заготовки в окружающее пространство, состоящие из потерь на излучение $q_{\text{т.п.}}^{\text{изл}}$, потерь конвекцией $q_{\text{т.п.}}^{\text{конв}}$ и потерь теплопроводностью (через контакты) $q_{\text{т.п.}}^{\text{тепл}}$.

$$q_{\text{т.п.}}^{\text{изл}} = C_0 \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-3},$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

ε – относительный коэффициент излучения, учитывающий отражательные свойства поверхности заготовки (для окисленной стали $\varepsilon = 0,8-0,9$; окисленной меди $\varepsilon = 0,7$; латуни – $\varepsilon = 0,6$);

T_3 — температура поверхности заготовки;

T_0 — температура окружающего воздуха.

$$q_{\text{т.п.}}^{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} (t_3 - t_0).$$

Тепловые потери теплопроводностью определяются по количеству и температуре отводящей воды

$$q_{\text{т.п.}}^{\text{тепл}} = g \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{860};$$

здесь g — часовой расход воды на один контакт (25–50 дм³);

Δt — температурный перепад в воде, охлаждающей контакты; около 30–40 °С.

Если пренебречь тепловыми потерями (что на практике допустимо), то уравнение (3.1) имеет вид

$$\tau = \frac{cG(t_k - t_n)}{I_{\text{ср}}^2 R}. \quad (3.2)$$

Опыт эксплуатации электронагревательных установок в кузнечно-штамповочном производстве показал, что оптимальная интенсивность нагрева заготовок (скорость выделения тепла — количество энергии, выделяемой в заготовке в единицу времени, отнесенное к единице ее длины) должна быть 4–6 ккал/с на 100 мм длины заготовки. Большие значения относятся к заготовкам большего диаметра. Исходя из постоянства выделения тепла в заготовке на единицу длины время, необходимое для нагрева до требуемой температуры заготовок любого сечения:

$$\tau = \frac{cG(t_k - t_n)}{(16,7 - 25) \cdot n},$$

где

$$n = \frac{l_3}{100 \text{ мм}}$$

или

$$\tau = \frac{cG_{100}(t_k - t_n)}{a}, \quad (3.3)$$

где c – средняя удельная теплоемкость при нагреве до t_k ;
 G_{100} – вес нагреваемой заготовки длиной 100 мм;
 t_k и t_n – конечная и начальная температура заготовки;
 a – средняя скорость выделяемого тепла в заготовке на 100 мм ее длины.

Как видно из формулы (3.3), длительность нагрева заготовок электродноконтактным методом не зависит от их длины. При нагреве заготовок круглого сечения длительность их нагрева пропорциональна квадрату диаметра, так как

$$G_{100} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = 0,785d^2 \cdot \gamma \cdot 10^{-3}.$$

Следует учесть, что активное и индуктивное сопротивление заготовок весьма резко меняется при повышении их температуры. В результате ток, напряжение и выделяющаяся в заготовке мощность, так же как тепловые потери, представляют собой мгновенные значения этих величин, изменяющиеся при нагреве. Для получения средних за цикл нагрева изменений данных величин, что необходимо для расчета времени нагрева и производительности установки, используется уравнение теплового баланса в развернутом виде:

$$I^2 R_3 dt = Gcdt + \alpha F(t - t_0) dt, \quad (3.4)$$

где G – масса заготовки;

c – удельная теплоемкость материала;

α – коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией.

В выражении (3.4) принимаем, что распределение температуры по длине заготовки и ее сечению равномерное.

Разделив переменные интегрирования, получим

$$dt = \frac{Gcdt}{I^2 R_3 - \alpha F(t - t_0)}. \quad (3.5)$$

Так как зависимости R_3 и α от температуры различны и весьма сложны, то проинтегрировать выражение (3.5) в общем виде не представляется возможным. Приходится разбивать кривую нагрева на

произвольные участки и строить ее по частям, считая значения I , R , и α в пределах каждого температурного интервала постоянными. Тогда для любого расчетного интервала время нагрева можно вычислить, проинтегрировав выражение (3.5):

$$\tau_i = \frac{Gc}{\alpha_i F} \ln \frac{I_i^2 R_{zi} - \alpha_i F(t_{ni} - t_0)}{I_i^2 R_{zi} - \alpha_i F(t_{ki} - t_0)},$$

где τ_i — длительность нагрева в течение интервала;

α_i — средний коэффициент теплоотдачи в интервале температур $t_{ki} - t_{ni}$ для температуры $(t_{ki} + t_{ni})/2$;

t_{ni} , t_{ki} — температуры заготовки в начале и конце интервала;

I_i — среднее значение тока в интервале для $t_{срi} = (t_{ki} + t_{ni})/2$;

R_{zi} — активное сопротивление заготовки при температуре $t_{срi} = (t_{ki} + t_{ni})/2$.

Полное время нагрева

$$\tau_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_i + \dots + \tau_k.$$

Время цикла $\tau_{цикл}$ получим, прибавив время загрузки и выгрузки установки τ_b :

$$\tau_{цикл} = \tau_n + \tau_b.$$

Следует иметь в виду, что определение параметров заготовки R_z на постоянном токе не представляет затруднений, надо лишь знать удельное электрическое сопротивление материала. Зависимость его от температуры также известна (рис. 3.4) или определяется по формуле

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)],$$

где ρ_t — удельное сопротивление при $t, ^\circ\text{C}$;

ρ_{20} — удельное сопротивление при $20 ^\circ\text{C}$;

α — температурный коэффициент.

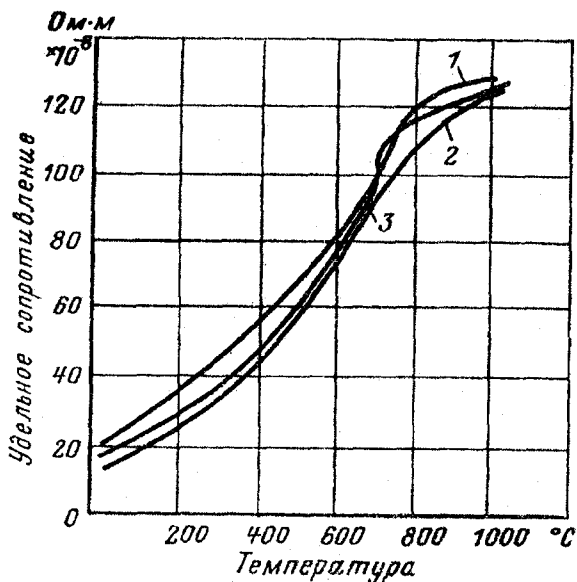


Рис. 3.4. Удельное электрическое сопротивление мягких сталей:
 1 – сталь 90, 1 % С; 2 – сталь 10, 0,1 % С; 3 – сталь 45, 0,45 % С

Однако установки контактного нагрева, как правило, работают на переменном токе, и в этом случае начинает сказываться поверхностный эффект, неравномерность распределения тока по сечению заготовки тем большая, чем больше ее диаметр и чем больше отношение последнего к глубине проникновения электромагнитной волны в металл. Формула для глубины проникновения в магнитный проводник остается такой же, как и для проводника из немагнитного (парамагнитного) материала:

$$Z_0 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}},$$

где Z_0 – глубина проникновения, м;

ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м;

f – частота, Гц.

На рис. 3.5 даны зависимости отношений $R_3/R_{3.п}$, $R_{3.ф}/R_{3.п}$, $x_3/R_{3.п}$ и $x_{3.ф}/R_{3.п}$ от отношения радиуса заготовки r_0 к глубине проникновения Z_0 , причем $R_{3.п}$ – сопротивление заготовок постоянному току; R_3 – сопротивление парамагнитных заготовок переменному току частоты 50 Гц; $R_{3.ф}$ – то же для ферромагнитных заготовок; x_3 и $x_{3.ф}$ – внутренние индуктивные сопротивления для парамагнитных и ферромагнитных заготовок соответственно.

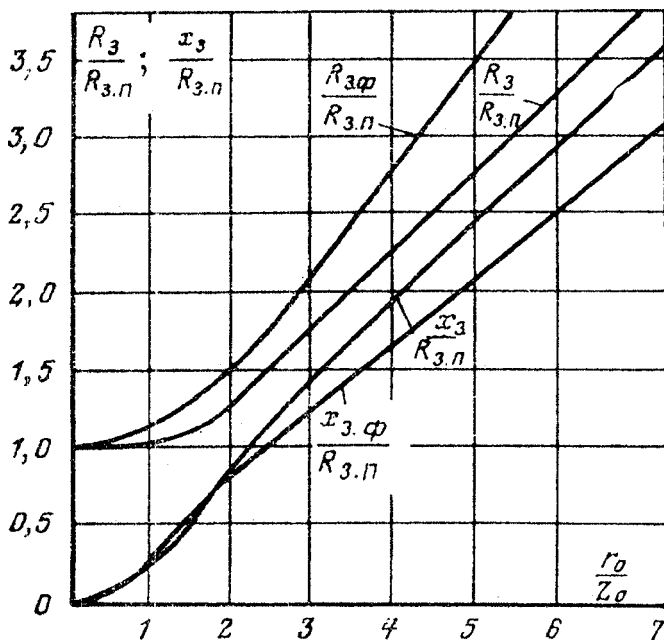


Рис. 3.5. График расчета активного и внутреннего индуктивного сопротивления цилиндрических заготовок из ферромагнитных и парамагнитных материалов

Определив сопротивление нагреваемой заготовки постоянному току, по графику рис. 3.5 найдем ее активное и индуктивное сопротивления переменному току.

Для заготовок из ферромагнитных материалов различной формы (прямоугольник, равнобокий уголок, тавр, двутавр и т. п.) можно приближенно использовать рис. 3.5, заменив отношение r_0/Z_0 на $2S/\Pi Z_0$, где S – сечение заготовки, а Π – ее периметр.

В электротехнике имеется следующее соотношение между величинами сопротивления заготовки при прохождении по ней постоянного и переменного токов:

$$R_3 = R_{3.п} \cdot 0,45d \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}.$$

При нагреве цилиндрических заготовок

$$R_3' = 0,57 \frac{l_3}{d} \sqrt{\mu \rho_l f}.$$

При расчете времени нагрева вторым способом (экспериментальным) можно воспользоваться графическими зависимостями, представленными на рис. 3.6, 3.7 или практическими данными.

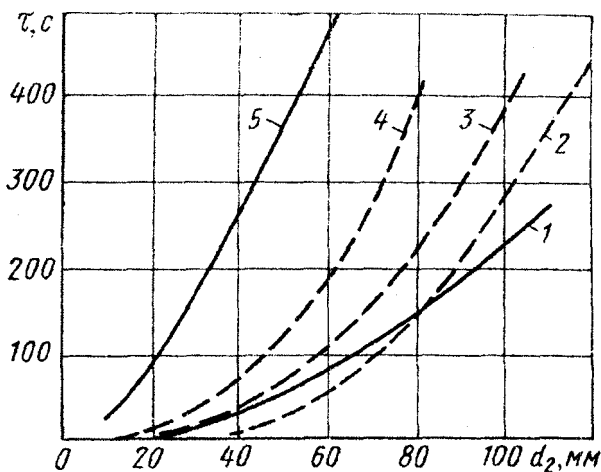


Рис. 3.6. Зависимость времени сквозного нагрева стальных заготовок различными способами от диаметра при температурном перепаде Δt между температурами центральной и поверхностной зон не больше 100°C (в конце нагрева):

- 1 — электроконтактный нагрев на однопозиционных установках ($\tau = 2(5 + d_2^2)$, с);
- 2, 3, 4 — индукционный нагрев соответственно при частоте 1000, 2500 и 8000 Гц;
- 5 — печной нагрев

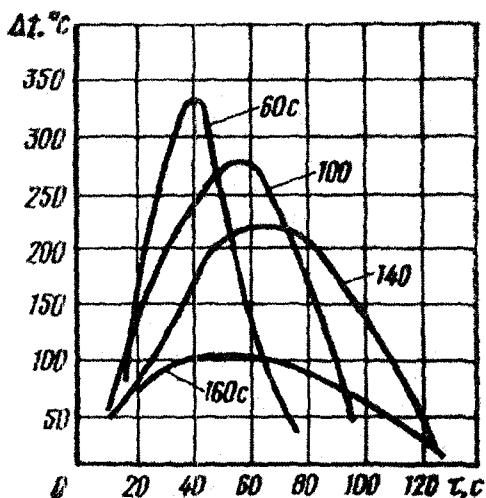


Рис. 3.7. Зависимость температурного перепада Δt между температурами поверхностной и центральной зон заготовки диаметром 70 мм от времени нагрева

Предельно допустимые продолжительности нагрева заготовок под ковку и штамповку, исключающие перегрев или плавление, в зависимости от диаметра заготовки приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

d , мм	10	20	30	40	50	60	70
τ , с	6	15	40	60	80	100	120

Время нагрева, задавшись предельной мощностью электроконтактной установки, можно определить из формулы

$$W = \frac{c \cdot n \cdot G(t_k - t_n)}{\eta \cdot \tau \cdot \cos \varphi},$$

где W – полная мощность, потребляемая из сети электроконтактным устройством;

c – средняя теплоемкость нагреваемого металла;

n – число одновременно нагреваемых заготовок;

G – масса металла одной нагреваемой заготовки или детали;

t_n, t_k – начальная и конечная температура нагреваемого металла;
 η – общий КПД электроконтактной установки;
 τ – время нагрева данной массы металла (nG);
 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности установки.

Производительность электроконтактной однопозиционной установки в основном зависит от времени нагрева и определяется по его значению и дополнительному промежутку времени, затраченному на загрузочно-погрузочные и транспортные операции. При нагреве на многопозиционных установках продолжительность дополнительных операций, наоборот, составляет основную долю времени по сравнению с временем, затраченным на нагрев в каждом цикле выдачи с установки нагретых заготовок.

Для установок любого типа в общем виде производительность определяют по формуле

$$\Pi = \frac{3,6nG}{\tau_n + \tau_d} = \frac{3,6nG}{\tau_{ц}}, \text{ т/ч,}$$

где n – число позиций;

G – масса нагреваемой заготовки, кг;

τ_n – время нагрева, с;

τ_d – время, затраченное на операцию замены нагретой заготовки холодной;

$\tau_{ц}$ – время цикла или темп выдачи нагретых заготовок.

3.2.2. Расчет коэффициента полезного действия установки

Коэффициент полезного действия электронагревательных установок является основным техническим показателем, характеризующим совершенство, эффективность и целесообразность ее применения.

В зависимости от конкретных обстоятельств для определения общего КПД электроконтактной нагревательной установки можно воспользоваться одной из двух формул, из которых одна выражает КПД через полезную энергию, необходимую для нагрева заготовки до заданной температуры, и потери энергии в установке, вторая выражает общий КПД через произведение КПД составных узлов и ее элементов.

Чтобы получить формулы для общего КПД через потери и полезную энергию, необходимо написать выражение баланса энергии (мощности), справедливое для любого момента времени нагрева той или иной заготовки:

$$W_0 = W_n + W_{тр} + W_u + W_\tau + W_ж,$$

где W_0 – мощность, потребляемая установкой из сети;

W_n – полезная мощность, затрачиваемая на нагрев детали;

$W_{тр}$ – мощность, теряемая в силовом трансформаторе;

W_u – мощность, теряемая в элементах короткой цепи установки;

W_τ – мощность тепловых потерь вследствие излучения, конвекции и теплопроводности;

$W_ж$ – мощность потерь в металлических деталях установки вследствие наличия магнитных потоков рассеяния проводников с током.

Пользуясь этим выражением, можно найти общий КПД нагревательной установки:

$$\eta_0 = \frac{1}{1 + \frac{W_{тр} + W_u + W_\tau + W_ж}{W_n}}. \quad (3.6)$$

Таким образом, рассчитав каждый вид потерь и зная необходимую полезную энергию или мощность, по формуле (3.6) можно найти общий КПД устройства.

На практике часто удобнее пользоваться формулой, выражающей общий КПД через КПД отдельных элементов устройства:

$$\eta_0 = \eta_{тр} \eta_э \eta_t, \quad (3.7)$$

где $\eta_{тр}$ – КПД силового трансформатора;

$\eta_э$ – электрический КПД установки;

η_t – тепловой КПД установки.

Формула (3.7) представляет в другом виде общее выражение (3.6). Ею удобнее пользоваться потому, что входящие в нее коэффициенты,

учитывающие отдельные виды потерь в элементах установки в процессе нагрева, известны из литературных источников или из практики.

Рассмотрим каждый из КПД, входящих в формулу (3.7).

КПД силового трансформатора $\eta_{\text{тр}}$ нагревательной установки учитывает потери энергии в обмотках и магнитопроводе, а также в крепежных металлических деталях.

Поскольку токи в обмотках и их электрическое сопротивление, а также индукция в трансформаторном железе и масса обмоток известны, то определение потерь в трансформаторе не представляет особых трудностей, а следовательно, КПД трансформатора можно рассчитать (если не представляется возможным взять его из справочника или других источников).

Общее выражение для КПД трансформатора будет иметь вид

$$\eta_{\text{тр}} = 1 - \frac{I_1^2 r_{\text{п}} + \Delta W_{\text{м}}}{W_{\text{н}}}, \quad (3.8)$$

где I_1 — сила тока в первичной обмотке трансформатора;

$r_{\text{п}}$ — активное сопротивление обмоток, приведенное к первичной обмотке;

$\Delta W_{\text{м}}$ — потери мощности в трансформаторном железе;

$W_{\text{н}}$ — номинальная мощность трансформатора.

Из формулы (3.8) видно, что для повышения КПД трансформатора необходимо стремиться к уменьшению сопротивления обмоток и силы тока при заданной мощности, так как обычно потери в магнитопроводе меньше потерь в обмотках.

КПД трансформаторов, разработанных НИИ тракторосельхозмаш для электроконтактных установок, находится в пределах 0,9–0,95.

Электрический КПД η_3 учитывает потери энергии в токоведущих элементах вторичной цепи установки. В общем виде электрический КПД можно выразить так:

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{r_{\text{м}}}{r_2}},$$

где r_m – электросопротивление токоподводящей короткой (вторичной) цепи;

r_2 – активное электросопротивление заготовок.

Так как сопротивление заготовки зависит от температуры, то и η_3 зависит от нее; следовательно, к концу нагрева КПД больше, чем в начальный период. Обычно речь идет о среднем значении КПД за период нагрева.

Поскольку на электроконтактных установках нагревают заготовки различного типа и различное их число одновременно, то целесообразно выразить электросопротивление r_2 через геометрические параметры заготовки с учетом числа позиций установки. Тогда

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{r_m}{\frac{S_2 n}{l_2} \sum_{i=1}^n \rho_i}}, \quad (3.9)$$

где S_2 – площадь поперечного сечения заготовки;

l_2 – длина нагреваемой зоны (части) детали;

ρ_i – удельное электросопротивление.

Следует иметь в виду, что в случае n -позиционной установки в сопротивление короткой цепи r_m установки войдут также сопротивления межпозиционных перемычек, а сопротивление контактов и подконтактных колодок возрастет в n раз по сравнению с однопозиционной установкой.

Из формулы (3.9) видно, что для получения оптимального η_3 необходимо по возможности уменьшить сопротивление элементов вторичной цепи и увеличить число позиций установки или увеличить значение отношения l_2/d_2 или l_2/S_2 .

На рис. 3.8 кривая 3 представляет собой зависимость η_3 от отношения l_2/S_2 при среднем значении удельного сопротивления детали $\rho_{cp} = 0,6$ мкОм в температурном интервале 20–1100 °С. Из кривой следует, что электрический КПД начинает быстро падать при l_2/S_2 меньше 1,0–1,5.

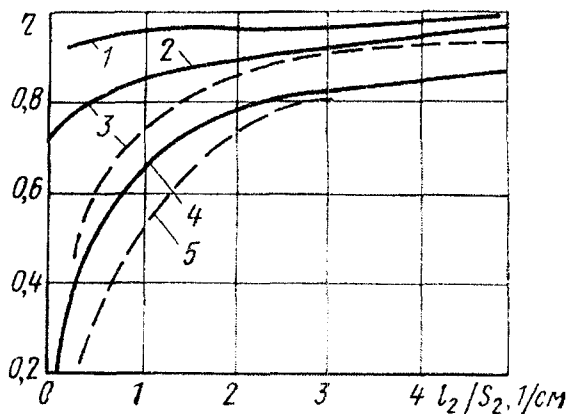


Рис. 3.8. Зависимость КПД электроконтактной установки от отношения длины к площади поперечного сечения нагреваемой заготовки:
 1 - η_t для $l_2 = 1000$ мм; 2 - η_t для $l_2 = 100$ мм; 3 - η_s для $Q_2 = 0,6$ мкОм; 4 - $\eta_0 = 0,94 \eta_t \eta_s$ (расчетный), η_t для $l_2 = 100$ мм; 5 - η_{03} - эксплуатационный КПД

На рис. 3.9 приведены зависимости $\eta_s = f(l_2/d_2)$.

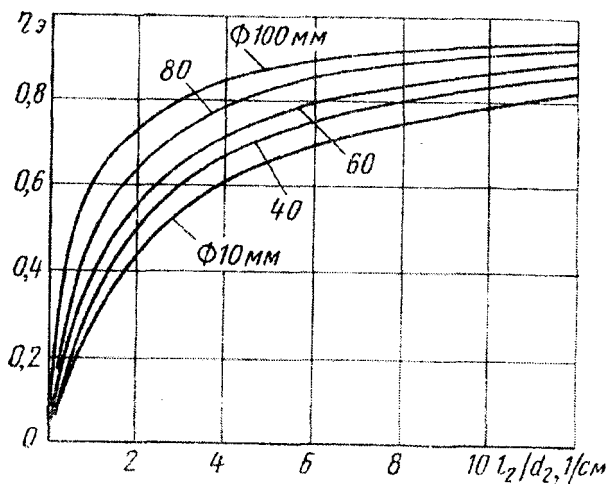


Рис. 3.9. Зависимость электрического КПД η_s электроконтактной установки от отношения l_2/d_2^2 цилиндрических стальных прутков при $U_n = \text{const}$ и $\tau = d_2$ при нагреве до 1100°C (время нагрева соответствует диаметру заготовки, измеренному в мм)

Тепловой КПД учитывает тепловые потери вследствие процессов теплового обмена нагреваемой заготовки с окружающей средой, а также потери на вихревые токи и гистерезис в стальных деталях каркаса и зажимных головках нагревательной установки, находящихся в магнитных полях проводников с током. Так как потери от перемагничивания незначительны и расчетным путем получить их весьма трудно, то ими обычно пренебрегают. Принимают во внимание только потери энергии вследствие излучения с поверхности, конвекции и теплопроводности с нагреваемой заготовки в окружающую среду и в токопроводящие контакты.

Тепловой КПД можно определить теоретически, учитывая перечисленные виды потерь и исходя из теоретического минимума энергии, потребного для нагрева данной массы металла нагреваемой детали до соответствующей предельной температуры.

Если предположить, что в нагреваемую заготовку диаметром d_2 и длиной l_2 передается потребное количество энергии для нагрева ее до заданной температуры 1000–1100 °С за время τ , и учесть тепловые потери указанных трех видов, то тепловой КПД однопозиционной установки можно выразить такой приближенной формулой:

$$\eta_t = \frac{1}{1 + \frac{0,36 \cdot 10^{-3} \tau}{d_2} \left[1 + \frac{0,56}{d_2^0 \cdot 5} \left(1 + \frac{18F_k}{d_2^0 \cdot 5l_2} \right) \right]}, \quad (3.10)$$

где F_k – поверхность контактирования одного контакта, см²; остальные обозначения упоминались ранее.

На рис. 3.8 кривые 1 и 2 представляют собой зависимость η_t установки от отношения l_2/S_2 см⁻¹ для различных указанных длин заготовок. В случае заготовок промежуточной длины тепловой КПД будет находиться между значениями, соответствующими этим двум кривым (для соответствующего отношения l_2/S_2).

Общий КПД электроконтактной установки может быть определен, если известны три коэффициента: η_z , η_t и $\eta_{тр}$, из которых первые два определяются по формулам (3.9) и (3.10), а $\eta_{тр}$ обычно равен 0,9–0,95.

На рис. 3.8 кривые 4 и 5 представляют общий и эксплуатационный КПД однопозиционной установки в зависимости от отношения

I_2/S_2 при $\eta_{\text{тр}} = 0,94$. Эксплуатационный КПД (кривая 5) соответствует производственным данным одной из однопозиционных электроконтактных установок.

Из кривых видно, что действительный КПД нагревательной установки в функции отношения I_2/S_2 в основном соответствует расчетно-теоретическому, отличаясь от него только при малых значениях I_2/S_2 , что объясняется, видимо, неточностью формулы для этого диапазона отношений и неточностью расчета и экспериментальных замеров.

3.2.3. Определение коэффициента мощности установки

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ наряду с η_0 является очень важным техническим показателем всякой электротермической установки. Особенно это относится к нагревательным установкам, в частности к электроконтактным, так как он характеризует их техническое совершенство и преимущества с энергетической точки зрения и производственных требований. Повышение его на 10–15 % весьма желательно, поэтому при разработке электроконтактных установок необходимо использовать все имеющиеся в распоряжении проектанта и конструктора средства, чтобы получить оптимальный для данных конкретных условий коэффициент мощности.

Коэффициент мощности заготовки при электроконтактном нагреве обычно близок к единице, а установки в целом, как никакая из рассмотренных характеристик, зависит от конструкции электрической цепи установки и силового трансформатора. Поэтому более рациональным представляется рассматривать $\cos \varphi$ всей установки, а не заготовки (или заготовок) отдельно.

Коэффициент мощности электроконтактной установки

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_m}{z_m},$$

где r_m – активное электросопротивление силовой цепи установки, приведенное к электросопротивлению первичной цепи силового трансформатора, включая нагрузку (заготовку или заготовки);

z_m – приведенный импеданс указанной цепи (общее сопротивление всей установки).

Поскольку конструкция печи зависит от конструкции всей установки, а следовательно, от конструктивно-технологического типа последней, то теоретически выразить $\cos\varphi$ какой-либо аналитической зависимостью от конкретных физических или геометрических параметров нагрузки или устройства весьма сложно и практически неудобно. Поэтому более рационально воспользоваться фактическими данными действующих установок и выразить графическими кривыми зависимость $\cos\varphi$ от основных параметров нагрузки и технологического режима, например, от времени нагрева τ .

Из анализа рис. 3.10, где приведены кривые изменения коэффициента мощности первичной цепи одно- и двухпозиционной установок в процессе нагрева заготовок различных типоразмеров, можно сделать следующие выводы:

1) $\cos\varphi$ однопозиционных установок изменяется в большей степени, чем $\cos\varphi$ двухпозиционных;

2) $\cos\varphi$ всех электроконтактных установок повышается к концу нагрева на 0,1–0,2;

3) $\cos\varphi$ изменяется в больших пределах и тем быстрее, чем меньше поперечные размеры нагреваемой заготовки. Это происходит потому, что у заготовок малого диаметра относительное влияние активного сопротивления значительно больше, чем у заготовок большего диаметра.

При электроконтактном нагреве характерным для нагреваемой заготовки является отношение длины нагреваемой зоны к площади поперечного сечения ($l_2/S_2, \text{см}^{-1}$).

Зависимость $\cos\varphi$ от l_2/S_2 одной из электроконтактных однопозиционных установок показана на рис. 3.10 (кривая 3). Видно, что с ростом указанного отношения коэффициент мощности растет сравнительно быстро до значения $l_2/S_2 = 1,0$ –1,5, а затем медленно приближается к максимальному значению (0,9–0,92).

Следует иметь в виду, что коэффициент мощности полезной нагрузки изменяется более резко по сравнению с приведенными графическими данными о его изменении в первичной цепи установки. Это объясняется влиянием вторичной токоподводящей цепи и силового трансформатора, импеданс которых практически почти не зависит от изменения в процессе нагрева нагрузки или параметров последней.

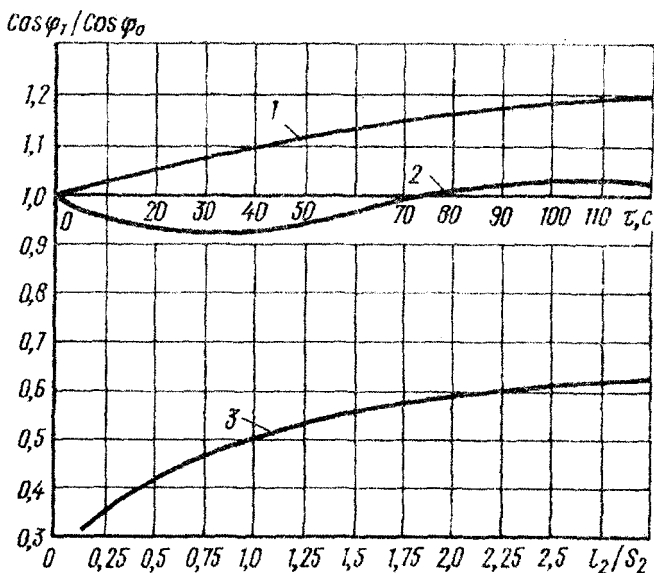


Рис. 3.10. Изменение коэффициента мощности при нагреве:

1 – для одно- и двухпозиционной установок (при одновременном нагреве двух заготовок до заданной температуры; 2 – для двухпозиционной установки при нагреве двух заготовок со смещением по температуре; 3 – для однопозиционной установки
 $\cos \varphi_1 = \varphi(l_2/d_2^2)$

3.2.4. Выбор типа и основных параметров силового трансформатора

Силовой трансформатор является основным и наиболее ответственным элементом электрооборудования электроконтактной нагревательной установки, от которого в значительной степени зависят надежность работы и срок службы установки. Он влияет также на характеристики режима нагрева и технические показатели установки. Поэтому разработке конструкции и расчету трансформаторов электроконтактных установок необходимо уделять серьезное внимание.

Конструкции трансформаторов нагревательных установок значительно отличаются от конструкции силовых трансформаторов общего назначения. Эти конструктивные отличия вызваны следующими обстоятельствами:

1. При нагреве металла методом сопротивления по нагреваемой установке, а следовательно, и по вторичной обмотке трансформато-

ра проходят токи очень большой силы – от сотен до десятков тысяч ампер, при напряжении на контактах от долей до десятков вольт.

2. Трансформаторы нагревательных установок, как правило, настраиваются непосредственно на установку, что ограничивает применение первичного напряжения до 500 В, а вторичного – до 36 В. (Это условие предусмотрено государственным стандартом и связано с обеспечением безопасности работы). В тех случаях когда вторичное напряжение выше 36 В, конструкция установки должна быть такова, чтобы токонесущие части во время их нахождения под напряжением были бы недоступны для прикосновения.

3. Вторичная обмотка трансформатора в подавляющем большинстве случаев состоит из одного витка. Это вызывается тем обстоятельством, что сечение меди вторичных обмоток достигает нескольких тысяч квадратных миллиметров и последовательное соединение даже двух таких массивных витков крайне затруднительно и громоздко. Ограничение в выборе числа витков вторичной, а следовательно, и первичной обмоток приводит к нарушению основного правила конструирования трансформаторов, т. е. получения при данной мощности наименьших потерь и наименьшей стоимости, но обычно это оправдывается упрощением конструкции как самого трансформатора, так и нагревательной установки.

4. В связи с необходимостью регулировать вторичное напряжение в широких пределах первичная обмотка (а иногда и вторичная) должна выполняться в виде секции.

5. В трансформаторах большой и средней мощности с целью экономии меди применяется водяное охлаждение обмоток.

6. По внешнему виду трансформатор в соответствии с общей компоновкой нагревательной установки и для сокращения вторичных контуров тока иногда может иметь форму, отступающую от принятых норм соотношений размеров.

Трансформатор состоит из следующих основных узлов: магнитопровода, обмоток и каркаса.

В зависимости от того, как расположен магнитопровод относительно обмоток, различают два типа трансформаторов: стержневые, в которых обмотка охватывает магнитопровод, и броневого, в которых обмотка охватывается магнитопроводами.

Правильный выбор типа и мощности силового трансформатора, а также его расположения имеет большое значение для рациональной компоновки всей электронагревательной установки. При расположении трансформатора непосредственно под контактными головками (рис. 3.11) пути вторичного тока будут наикратчайшими, а площадь, охватываемая вторичным контуром, наименьшая [5].

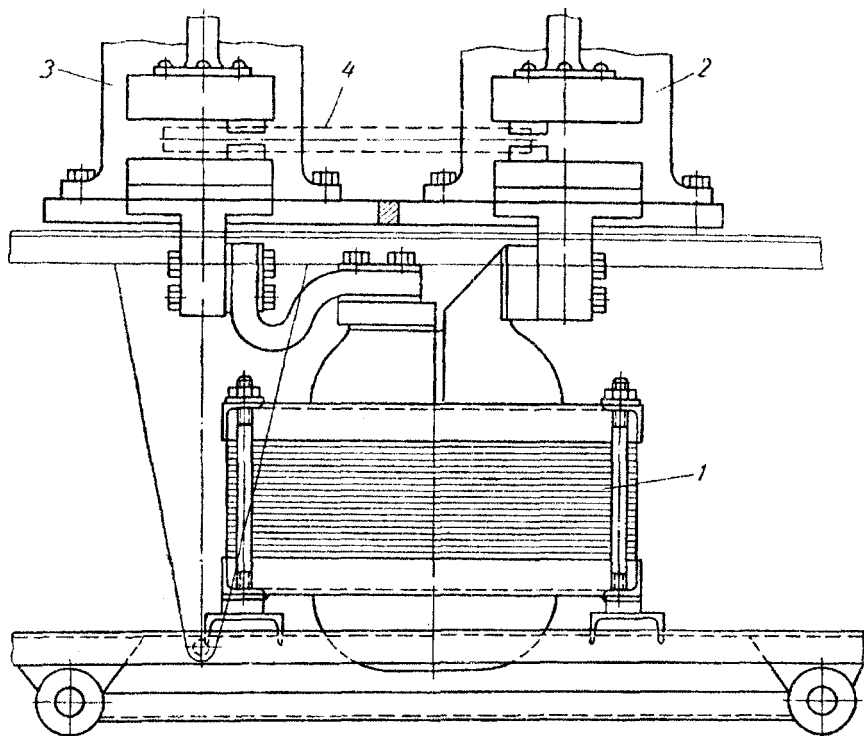


Рис. 3.11. Размещение силового трансформатора под контактными зажимными головками:

- 1 – трансформатор броневого типа; 2 – неподвижная контактная головка;
3 – подвижная контактная головка; 4 – нагреваемая головка

Иногда к нагревательной установке предъявляются особые требования, связанные с положением нагреваемой заготовки над уровнем пола, вследствие чего трансформатор не удастся расположить под контактными головками и его приходится устанавливать в стороне (рис. 3.12).

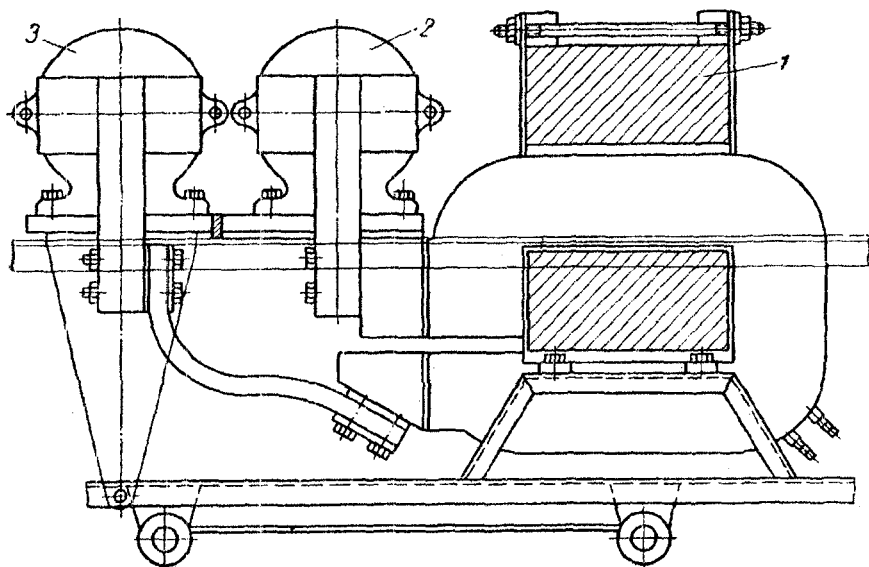


Рис. 3.12. Размещение силового трансформатора сбоку относительно контактных зажимных головок:

1 – трансформатор стержневого типа; 2 – неподвижная контактная зажимная головка; 3 – подвижная контактная зажимная головка

Работа трансформатора в электронагревательной установке характеризуется графиком, приведенным на рис. 3.13.

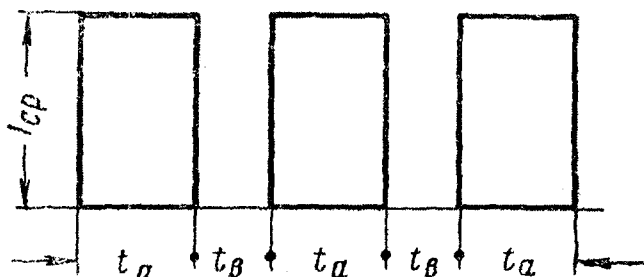


Рис. 3.13. График повторно-кратковременной работы трансформатора:
 t_a – время работы трансформатора под нагрузкой; t_b – время пауз между нагрузками

Высота столбиков соответствует среднему значению силы тока I_{cp} трансформатора за время нагрева, а их ширина – продолжительно-

сти времени включения трансформатора под нагрузкой t_a . Расстояние между столбиками соответствует продолжительности пауз между включениями трансформатора t_b .

Если значения t_a и t_b постоянны, то отношение времени нахождения трансформатора под нагрузкой t_a к времени всего цикла $t_a + t_b$ будет коэффициентом повторного включения ПВ:

$$\text{ПВ} = \frac{t_a}{t_a + t_b} \cdot 100 \%$$

Если отдельно взятые величины t_a и t_b не равны между собой, то берется отношение их сумм:

$$\text{ПВ} = \frac{\sum t_a}{\sum t_a + \sum t_b} \cdot 100 \%$$

В результате повторно-кратковременной работы трансформатор через некоторый промежуток времени нагреется до определенной температуры. Однако необходимо следить, чтобы эта температура не превосходила допустимую для данного трансформатора.

Для установления величины перегрузки, которую можно дать трансформатору при определенном режиме работы, т. е. при определенном ПВ, можно с достаточной для практических целей точностью пользоваться кривой (рис. 3.14), построенной по методу среднеквадратичных токов.

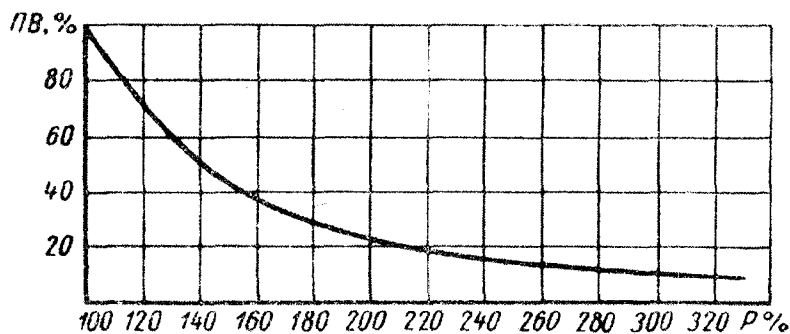


Рис. 3.14. Зависимость режима работы трансформатора от нагрузки

Активная мощность силового трансформатора для нагревательной установки определяется по максимальному часовому количеству металла, которое будет нагреваться на этой установке. Расчет мощности производится с учетом наибольшей заготовки по следующей формуле:

$$P_{\text{ак}} = \frac{Gc(t_{\text{к}} - t_0)}{\tau\eta}, \quad (3.11)$$

где G – вес нагреваемой заготовки, кг;

c – средняя удельная теплоемкость материала нагреваемой заготовки при нагреве ее до температуры $t_{\text{к}}$;

t_0 – начальная температура заготовки, °С;

$t_{\text{к}}$ – конечная температура заготовки, °С;

τ – длительность нагрева заготовки, с; при заданной скорости нагрева определяется по формуле (3.2);

η – коэффициент полезного действия установки, который ориентировочно определяется по кривой (рис. 3.15), учитывающей все потери в установке, включая и потери заготовки (излучением, конвекцией и теплопередачей).

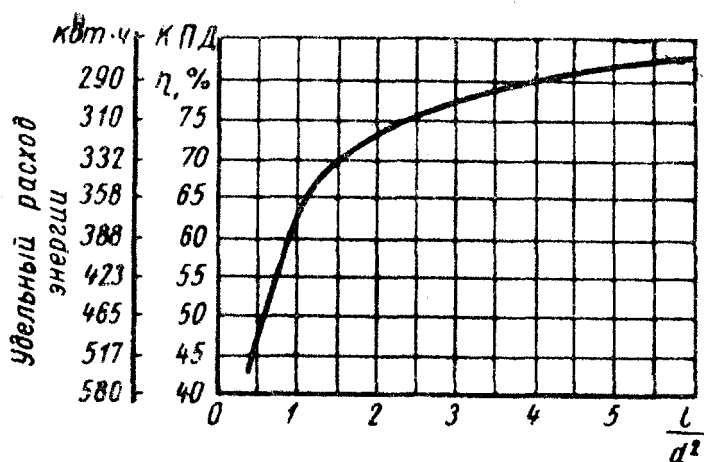


Рис. 3.15. Зависимость КПД и удельного расхода электроэнергии от отношения l/d^2 (l – длина; d – диаметр нагреваемой заготовки, см; удельный расход электроэнергии, кВт·ч на 1 т стали, нагретой до 1200 °С)

Кажущаяся мощность трансформатора определяется из формулы

$$P_{\text{каж}} = \frac{P_{\text{акт}}}{\cos \varphi}.$$

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) может быть ориентировочно определен по кривой (рис. 3.16) испытания электронагревательной установки типа К-13 мощностью 200 кВ·А, устанавливающей зависимость $\cos \varphi$ от величины отношения l/d^2 . Расчетная длительная мощность трансформатора определится из уравнения

$$P_{\text{расч}} = \sqrt{P_{\text{каж}}^2 \cdot \text{ПВ}} = P_{\text{каж}} \sqrt{\text{ПВ}}, \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

где ПВ – показатель повторного включения, %.

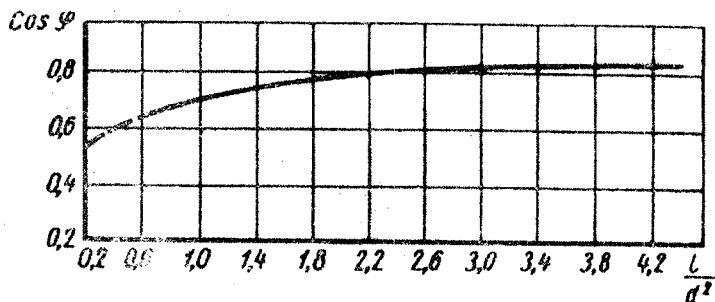


Рис. 3.16. Изменение коэффициента мощности в зависимости от отношения l/d^2 нагреваемой заготовки

Определить величину вторичного напряжения, при котором заготовка нагревалась бы в течение заданного времени, трудно. На основании большого экспериментального материала была выведена эмпирическая формула, позволяющая с достоверной для практики точностью определить среднее значение подводимого к заготовке напряжения, при котором она должна нагреться в заданный срок:

$$V_{\text{ср}} = 7,07 \frac{I_{\text{к}}}{\eta \sqrt{\tau}}, \text{ В}, \quad (3.12)$$

где $V_{\text{ср}}$ – среднее за время нагрева вторичное напряжение, подводимое к заготовке, В;

l_k — длина нагреваемой части заготовки (расстояние между контактами), мм;

η — коэффициент полезного действия установки, % (определяемый по кривой рис. 3.15);

τ — длительность нагрева заготовки, с.

Расчеты по формуле (3.12) при скоростях нагрева 4–6 ккал/с на 100 мм длины заготовки дают вполне удовлетворительные результаты.

Для перехода от напряжения, полученного по формуле (3.12), к напряжению холостого хода трансформатора следует расчетным путем определить падение напряжения во вторичной цепи и трансформаторе или использовать приведенную на рис. 3.17 кривую падения напряжения в нагревательной установке типа К-13 с трансформатором мощностью 200 кВ·А в зависимости от величины среднего значения вторичного тока.

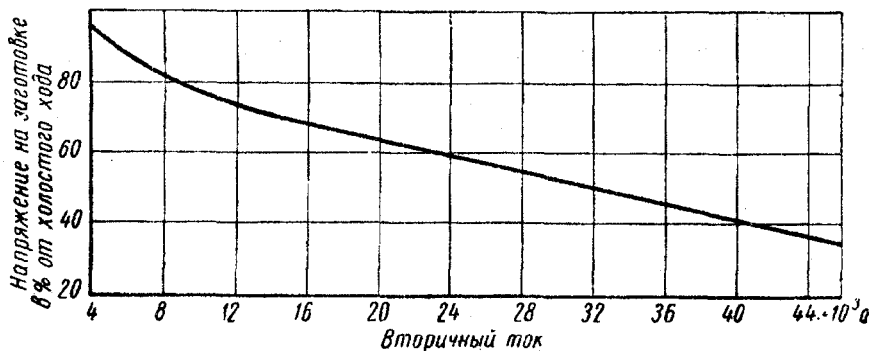


Рис. 3.17. Падение напряжения в силовом трансформаторе в зависимости от величины вторичного тока (электронагревательная установка К-13)

Величина последнего может быть определена по формуле

$$I_2 = \frac{P_{\text{заг}}}{V_{\text{ср}}}, \text{ А,}$$

где $P_{\text{заг}}$ — средняя мощность, затрачиваемая на нагрев заготовок и определяемая по формуле (3.11):

$$P_{\text{заг}} = \frac{Gc(t_k - t_0)}{\tau}, \text{ кВт.}$$

Потерями тепла заготовки (излучением, конвекцией и теплопередачей) ввиду незначительной длительности нагрева можно пренебречь.

Напряжение холостого хода трансформатора, соответствующее найденному $V_{\text{ср}}$, будет

$$V_{\text{хх}} = \frac{V_{\text{ср}}}{V\%} \cdot 100, \text{ В,}$$

где $V\%$ – напряжение на заготовке, % от холостого хода (по кривой рис. 3.17).

Напряжение холостого хода трансформатора определяется для нагрева двух противоположных по размерам заготовок: для самой длинной и тонкой и самой короткой и толстой.

На рис. 3.18 показано изменение подведенного к заготовке вторичного напряжения в процессе ее нагрева до 1200 °С для различных диаметров заготовок. Наибольшее изменение вторичное напряжение претерпевает при нагреве тонких заготовок (кривая 1), что вполне понятно, так как здесь влияние поверхностного эффекта и индуктивности сказывается весьма незначительно. Омическое же сопротивление, увеличиваясь с ростом температуры, ограничивает ток, а следовательно, и мощность, потребляемую заготовкой. Падение напряжения в установке уменьшается, а на концах заготовки увеличивается.

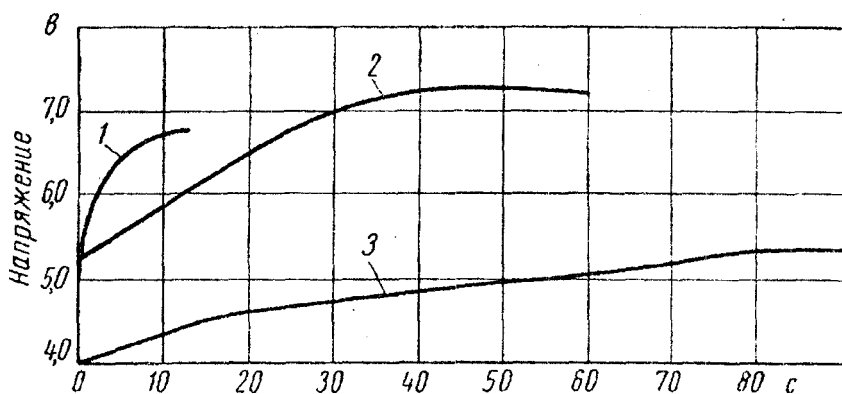


Рис. 3.18. Изменение напряжения, подведенного к заготовке, во время ее нагрева: 1 – диаметр заготовки 25 мм, длина 250 мм; 2 – диаметр заготовки 45 мм, длина 500 мм; 3 – диаметр заготовки 65 мм, длина 400 мм

При нагреве толстых заготовок (кривая 3) наличие поверхностного эффекта и индуктивности в начале нагрева увеличивает общее сопротивление заготовки, ограничивая вторичный ток; постепенно с нагревом влияние этих факторов сопротивления уменьшается, но зато возрастает омическое сопротивление. Таким образом, общее сопротивление заготовки не претерпевает такого изменения, как в первом случае, а следовательно, и вторичное напряжение изменяется не так значительно.

Как указывалось выше, скорость нагрева заготовки зависит от количества выделяемой в ней электроэнергии в единицу времени, т. е. от величины подводимой к заготовке мощности.

Выделяемая в заготовке мощность определяется уравнением

$$P = I^2 R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

где I – сила тока, проходящего по заготовке, А;

R – активное сопротивление заготовки, Ом.

Сопротивление заготовки в процессе нагрева изменять нельзя, поэтому скорость последнего может быть изменена только путем изменения величины проходящего по заготовке тока.

Величина же тока зависит от приложенного к сопротивлению напряжения

$$I = \frac{U}{R}.$$

Следовательно, регулировка скорости нагрева сводится к изменению приложенного к заготовке напряжения. Для этой цели обычно применяется ступенчатое регулирование силового трансформатора путем изменения числа включенных в сеть витков первичной обмотки. Чем большее число витков подключено к сети, тем меньшая электродвижущая сила получится на вторичном витке.

Широкие пределы регулирования ЭДС вторичной обмотки приводят к увеличению числа витков первичной обмотки, увеличению сечения магнитопровода и, следовательно, к увеличению веса стали и меди, габаритных размеров и стоимости трансформатора и ухудшению его электрических параметров. Поэтому к определению диа-

пазона регулирования следует отнестись весьма внимательно и в некоторых случаях может быть выгоднее распределить номенклатуру нагреваемых заготовок на две различные нагревательные установки, чем делать одну универсальную.

Число ступеней регулирования выбирается в соответствии с требующейся плавностью регулирования вторичной ЭДС.

Для нагрева кузнечных заготовок под ковку и штамповку не требуется особо плавного регулирования скорости нагрева и число ступеней может быть ограничено пятью–восемью. Для нагрева под электровысадку требуется более плавное регулирование, тогда число ступеней принимают от 15 и выше.

Для ступенчатого регулирования может быть также применен автотрансформатор, через который напряжение подается на силовой трансформатор. В тех случаях, когда требуется особо плавное регулирование напряжения, можно применять обычное ступенчатое регулирование и автотрансформатор. Однако необходимо помнить, что автотрансформатор удорожает нагревательную установку и его применение может быть оправдано лишь в исключительных случаях.

Технические данные трансформаторов различной мощности приведены в табл. 3.4 [6].

Из приведенных в табл. 3.4 данных можно сделать следующие выводы: трансформаторы обеспечивают довольно широкий диапазон мощностей и вторичных напряжений; потери холостого хода и короткого замыкания трансформаторов невелики; по расходу активных материалов и общей массе, приходящейся на 1 кВ·А мощности трансформатора, они либо ниже по этому показателю, либо находятся на уровне сварочных и печных трансформаторов.

Трансформаторы описанных типов мощностью от 20 до 500 кВ·А используют в различных конструктивно-технологических группах электродных установок.

Таблица 3.4

Технические показатели однофазных трансформаторов

Мощность кВ·А	Магнитопровод		Обмотки						Общая масса трансформатора, кг	Общая масса обмотки, кг	Масса меди, кг	Общая масса трансформатора, кг	Масса, кг/кВ·А		Лабаритные размеры трансформатора, мм	Напряжения, В				
	Сечение, мм	Масса, кг	первичная			вторичная							Медь обмоток	железа магнитопровода		всего трансформатора	Лабаритные размеры	первичное	вторичное	
			число витков	число катушек	сечение проводов обмотки, мм ²	число витков	число витков, соединенных параллельно	сечение витков, мм ²												
35	260	260	112	8	41	2	2	2	2	2	2	332	2,5	4,8	9,5	500×650×450	380	7-13		
												88,2								
70	221	221	128	8	82	2	-	-	-	-	-	430	2,7	2,7	6,1	660×503×510	380	3-6		
95	280	288	72	12	164	1-6	-	-	-	-	-	630	2,3	2,6	6,6	640×560×720	380	5-47,5		
150	624	624	48	4	330	1-6	-	-	-	-	-	1122	2,3	4,1	7,5	590×660×735	380	8-16		
250	576	576	48	16	328	1	-	-	-	-	-	1450	1,7	3,2	5,8	800×655×1125	380	8-16		
500	736	736	36	2	277	1	-	-	-	-	-	1100	0,48	1,46	2,2	700×880×900	380	31-62		

Л и т е р а т у р а

1. Свенчанский, А.Д. Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975. – 384 с.
2. Расчет нагревателей электрических печей сопротивления / И.А. Фельдман [и др.]. – М.: Энергия, 1966. – 104 с.
3. Логачёв, М.В. Расчеты нагревательных устройств: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением», 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»: в 3 ч. / М.В. Логачев, Н.И. Ива­ницкий, Л.М. Давидович. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1: Расчет пламенных печей. – 160 с.
4. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов / Д.И. Романов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 166 с.
5. Натанзон, Е.И. Электронагрев методом сопротивления и электровысадка / Е.И. Натанзон, Г.М. Тельнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1964. – 136 с.
6. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1: Материалы и нагрев. Оборудование. – 568 с.

Содержание

Введение.	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ.	4
2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОСВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ.	9
2.1. Определение времени нагрева заготовок в печах периодического действия.	9
2.2. Определение основных размеров печного пространства и внешних габаритов печи.	28
2.3. Составление энергетического баланса и определение установочной мощности печи.	29
2.4. Материалы для нагревательных элементов электрических печей сопротивления.	34
2.5. Расчет нагревательных элементов электрических печей сопротивления.	44
2.5.1. Расчет металлических нагревателей.	46
2.5.2. Расчет керамических электронагревателей.	70
2.6. Особенности расчета электрических методических печей.	82
2.7. Автоматическое регулирование температурного режима электропечей сопротивления.	94
3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ.	94
3.1. Техническая характеристика и конструкция электроконтактных нагревательных установок.	95
3.2. Расчет электроконтактных нагревательных установок.	100
3.2.1. Расчет времени нагрева и производительности установок.	100
3.2.2. Расчет коэффициента полезного действия установки.	109
3.2.3. Определение коэффициента мощности установки.	115
3.2.4. Выбор типа и основных параметров силового трансформатора.	117
Литература.	129