

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Маляров А.И. Солохненко В.В. Алёшин М.А.

**РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ
СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Методические указания к расчётно-графической работе по курсу «Печи в литейном производстве» для студентов, обучающихся по специальностям 150204 - «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», а также по направлениям подготовки бакалавра 150400 – «Технологические машины и оборудование» и магистра 150400– «Технологические машины и оборудование». Специализация – «Машины и технология литейного производства».

Одобрено методическими комиссиями по специальностям 150204 – «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», и направлению подготовки 150400 – «Технологические машины и оборудование».

УДК 621.745.

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000г. для специальностей 150204 - «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», а также направлений подготовки бакалавра 150400 – «Технологические машины и оборудование» и магистра 150400– «Технологические машины и оборудование». Специализация – «Машины и технология литейного производства».

Рецензенты:

-доцент кафедры «Технология конструкционных материалов»,
к.т.н. Шлыкова А.В.

- доцент кафедры «Электрооборудование автомобилей» Хортов В.П.

Работа подготовлена на кафедре «Машины и технология литейного производства»

Расчёт электрических нагревателей сопротивления: Методические указания к расчётно-графической работе по курсу «Печи в литейном производстве» для студентов направления подготовки дипломированных специалистов по специальности 50200.65 — «Машиностроительные технологии и оборудование», и специальности 150204.65 «Машины и технология литейного производства» / А.И. Маляров, В.В. Солохненко, М.А. Алешин - М.: МГТУ «МАМИ», 2011.

В методических указаниях изложена методика и примеры расчёта электрических нагревателей изготавливаемых из жаростойких сплавов и силитовых стержней. Сформулированы вопросы для самопроверки знаний студентов.

Приведены индивидуальные задания для расчетов и построения графиков.

Цель расчётно-графической работы приобретение навыков расчёта электрических нагревателей сопротивления, необходимых для проектирования и эксплуатации промышленных и лабораторных печей этого типа

621.745

УДК

©А.И. Маляров, В.В. Солохненко, М.А. Алешин
©МГТУ «МАМИ», 2011

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сопротивления широко используются в электронагревателях печей для всех отраслей промышленности и бытовых приборов. Они используются в высокотемпературных электропечах, печах обжига и сушки, различных электрических аппаратах теплового действия. Наряду с серийно выпускаемыми нагревателями, основанными на использовании электрических сопротивлений, в инженерной практике часто приходится создавать нетиповые устройства этого вида.

На первый взгляд расчёт электрического нагревательного сопротивления не представляет сложностей. Действительно, если заданы мощность нагревателя $N_{\text{наг}}$ и напряжение питающей сети U , сила тока, протекающего через нагреватель должна быть равна:

$$I = \frac{N_{\text{наг}}}{U}, \text{ А} \quad (1)$$

Для этого сопротивление нагревателя определится по формуле:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом} \quad (2)$$

Удельное электрическое сопротивление выбранного материала ρ определяют по справочникам, тогда:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \text{ где:} \quad (3)$$

l - длина проводника, м;

S - сечение проводника, м^2 .

Таким образом, решение задачи неоднозначно, т.е. требуемое сопротивление R можно получить, используя тонкую проволоку сечением S_1 небольшой длиной l_1 или проволоку большего сечения S_2 и большей длины l_2 .

Для профессионального решения, рассматриваемой технической задачи, необходимо изучить методику расчёта электрических нагревателей.

1. Материалы, используемые для электрических нагревателей сопротивления

1.1 Сплавы, используемые для электросопротивлений.

С этой целью используются термостойкие сплавы с высоким удельным электрическим сопротивлением. С повышением температуры его величина растёт.

Наибольшее распространение имеют сплавы на основе никеля–**нирезисты**. Они выпускаются в виде проволоки диаметром от 0,1 до 7мм и более и ленты сечением от 0,1х20мм до3,0х40мм и более.

В таблице 1.1 приведён химический состав нирезистов (содержание вредных примесей не указано).

Таблица 1.1

Химический состав нирезистов

Марки сплавов	Содержание основных элементов, %				
	Ni	Cr	Al	Fe	Другие эл-ты
X20H80	79-81	20,0-23,0	< 0,20	< 1,0	-
X20H80-H	79-81	20,0-23,0	< 0,20	< 1,0	Zr 0,2-0,5
XH70Ю	68-71	Остальное	3,0-3,8	<1,5	-
XH70Ю-H	68-71	Остальное	3,0-3,8	<1,5	Ba < 0,1;Ce < 0,03
X15H60	55,0-61,0	15,0-18,0	< 0,20	Остальное	-
X15H60-H	55,0-61,0	15,0-18,0	< 0,20	Остальное	Zr 0,2-0,5

Температуры работы нихромовых нагревателей можно определить ориентировочно по рис. 1.1. Уточнить эту величину можно по таблице 1.2 с учётом диаметра или толщины материала нагревателя. Из таблицы 1.2 видно, что с увеличением содержания никеля в сплавах класса нирезист допустимые температуры работы нагревателя увеличиваются. Однако при этом увеличивается и стоимость сплава. Присадки циркония, церия и бария также увеличивают допустимые температуры работы нагревателя.

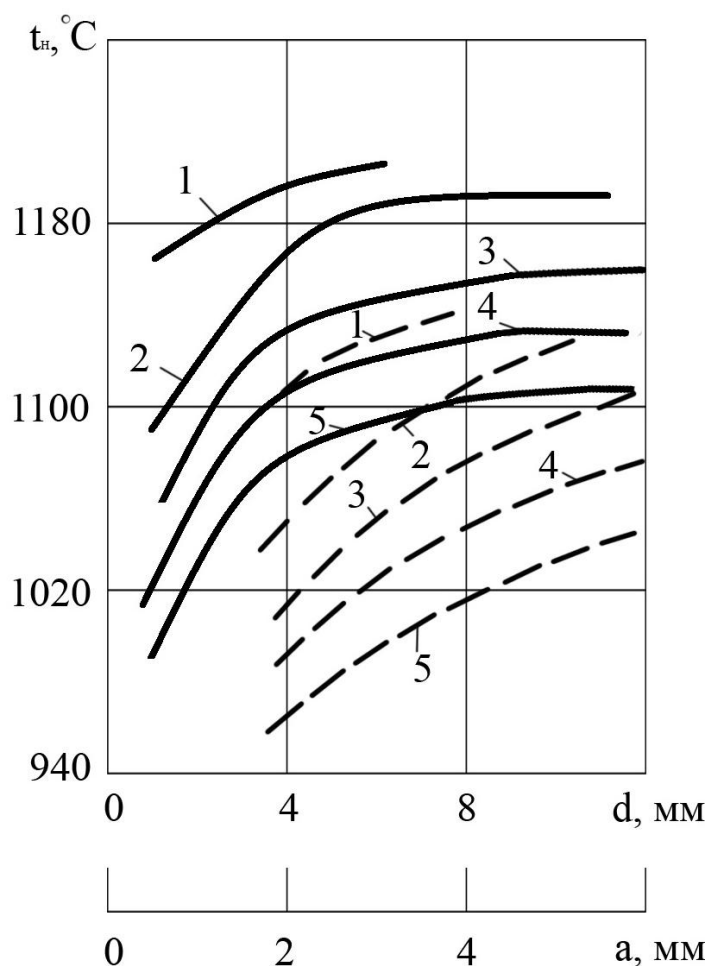


Рис. 1.1 Максимальные (сплошные линии) и рекомендуемые (штриховые линии) температуры нагревателей из различных сплавов: 1 – X20H80-H; 2 – X20H80; 3 - X15H60-H; 4 – X25H20; 5 – X15H60.

Таблица 1.2

Максимальные допустимые температуры работы нихромовых нагревателей

Марка сплава	Рекомендуемая максимальная рабочая температура нагревательного элемента работающего на воздухе, °C в зависимости от диаметра или толщины продукции, мм				
	0,2	0,4	1,0	3,0	6,0 и более
X20H80 (X20H80-H)	950	1000	1100	1150	1200
XH70Ю-H	950	1000	1100	1175	1200
XH20ЮС	900	950	1000	1050	1100
X15H60 (X10H60-H)	900	950	1000	1075	1125

Другим классом жаростойких сплавов для электронагревателей сопротивления является **фехраль**. Фехраль марки Х23Ю5Т содержит хрома Cr 22-24%, алюминия Al - не более 5-5,8%, никеля Ni - до 0,6%, титана Ti - 0,2-0,5%, железо Fe - остальное. Особое распространение получила проволока из фехрали, позволяющая осуществлять нагрев до 1400°C.

При выборе класса сплава для проектируемого нагревателя следует учитывать их преимущества и недостатки, приведённые ниже.

Нихром

Преимущества:

- Не образуется поверхностный окисел при эксплуатации
- Количество циклов включения-выключения нагревательных элементов до их разрушения значительно больше (при температурах больших 600°C)
- Более высокая прочность

Недостатки:

- Более высокая стоимость (в три раза дороже фехраля)

Применение: Нагреватели электротермического оборудования повышенной надежности (ГОСТ 10994-74)

Срок службы нагревателей из сплавов Х27Н70Ю3 и Х15Н60Ю5А на 30 % выше, чем для сплава Х20Н80. Ориентировочно срок службы нагревателей, изготовленных из железохромоалюминиевых сплавов, может быть принят равным 2500—3000 ч для предельных температур (сплав Х23Ю5 1200 °С, сплав Х27Ю5Т 1300 °С).

Фехраль

Преимущества:

- Имеет большее удельное сопротивление, меньший удельный вес, следовательно, более экономичен

- Более устойчив в высокоглиноземной керамике и серосодержащей атмосфере

Недостатки:

- Образует поверхностный окисел с высоким удельным сопротивлением
- Количество циклов включения-выключения нагревательных элементов до их разрушения значительно меньше (при температурах больших 600°C)
- Меньшая прочность и повышенная хрупкость
- Навивка спиралей при температуре не менее 300°C

Применение: Нагреватели электротермического оборудования в высокоглиноземной керамике и серосодержащей атмосфере. Нагреватели электротермического оборудования, способные осуществлять нагрев до 1400°C.

1.2 Силитовые электрические нагреватели

Силитовые нагреватели представляют собой карборундовые стержни (карбид кремния). Карборунд хорошо выдерживает температуру до 1400 – 1450°C и, следовательно, может обеспечить работу электрических печей до 1350-1400°C. Срок службы нагревателей в электрической печи может колебаться в пределах от сотен до тысяч часов.

Удельное сопротивление силита изменяется в больших пределах и достигает у разных типов нагревателей $4 \cdot 10^{-4}$ – $4 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, поэтому его применяют лишь в сравнительно больших сечениях, диаметром от 8 до 45мм и длиной активной части до 1200мм. Кроме того, на заводе-изготовителе подбирают партии нагревателей в 6 – 12 штук примерно одного сопротивления.

Силитовые нагреватели производятся в форме стержней с активной зоной расположенной в центральной части и холодными зонами по обеим сторонам. Токовыми подсоединениями являются холодные концы, покрытые порошковым алюминием. На рис.1.2 показаны два типовых варианта конструкции силитовых стержней.

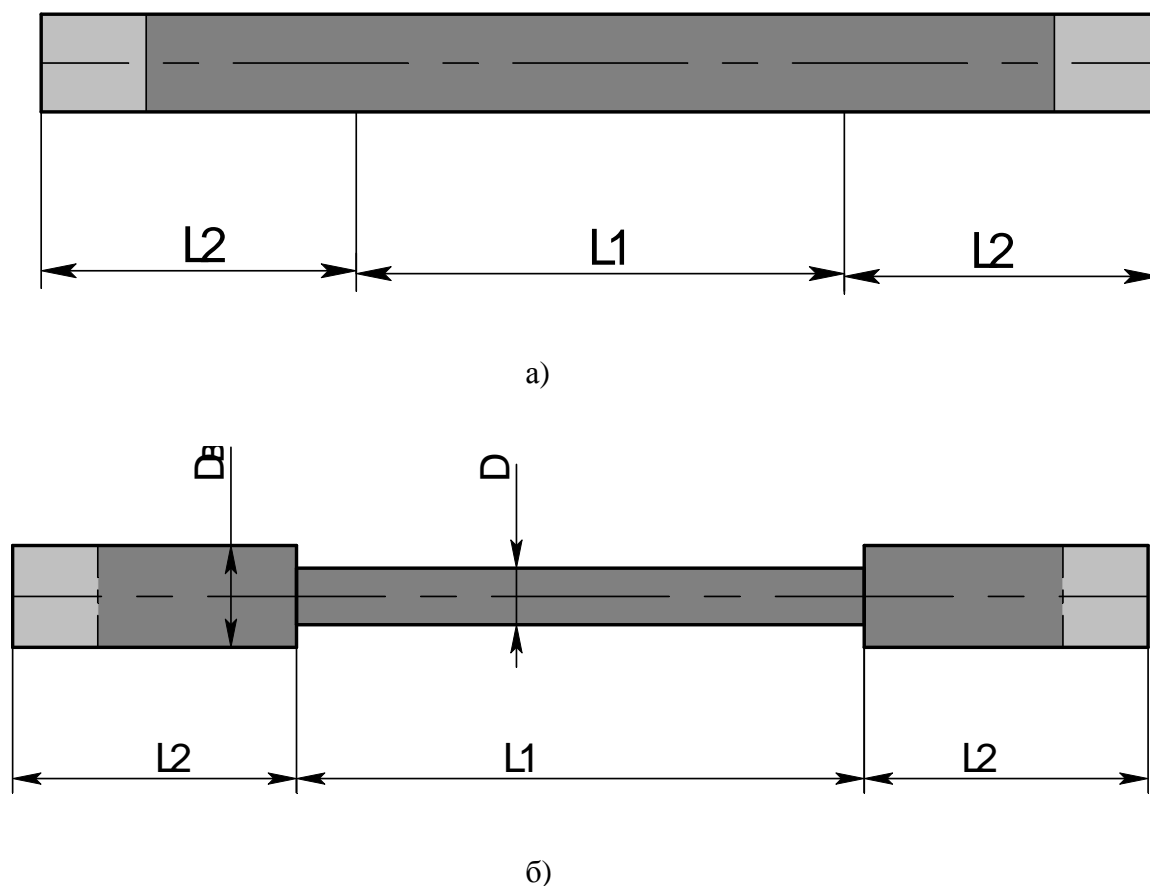


Рис. 1.2 Варианта конструкции силитовых стержней.

а) – цилиндрический; б) – гантелеобразный.

Гантелеобразный нагреватель позволяет уменьшить выделение тепла в наружных контактных частях.

Силитовые стержни в нагретом состоянии хрупкие и малопрочные и требуют осторожного обращения. В процессе нагрева от комнатной температуры до 700°C удельное электрическое сопротивление силитовых стержней уменьшается примерно в 3 раза. Поэтому они чувствительны к быстрому нагреву, вследствие чего разогрев печи следует производить постепенно. Для этого нередко используют регулировочные трансформаторы, позволяющие по мере повышения температуры снижать напряжение, с тем, чтобы сила тока не превысила максимально допустимую величину.

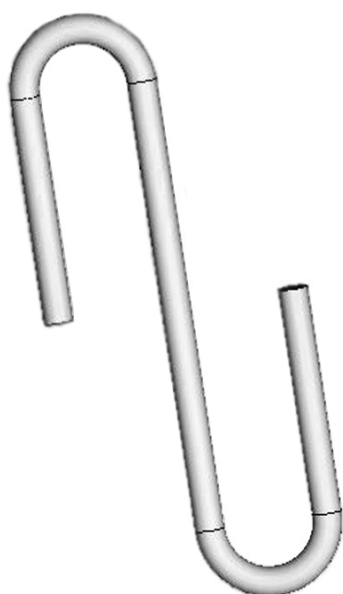
Карборундовые нагреватели крайне чувствительны к окружающей их атмосфере. В частности к парам воды и контакту с основными огнеупорами.

Поэтому перед установкой в печь силитовых стержней её необходимо тщательно просушить.

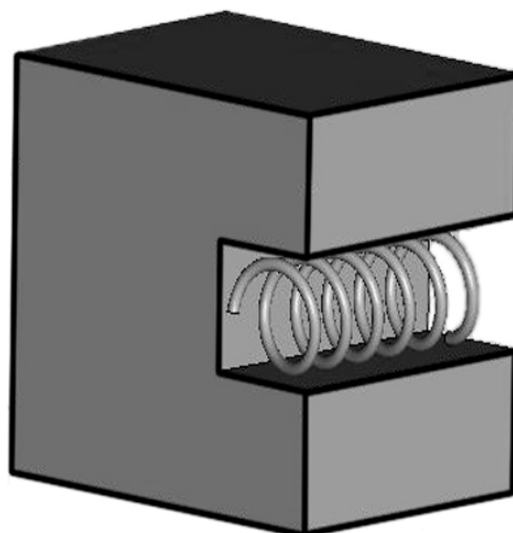
2. Конструкция нагревателей сопротивления

2.1 Конструкция нагревателей из термостойких сплавов

Нагреватели, как правило, изготавливают в виде зигзага из проволоки и ленты и в виде спирали из проволоки. Способы их размещения показаны на (рис.2.1).



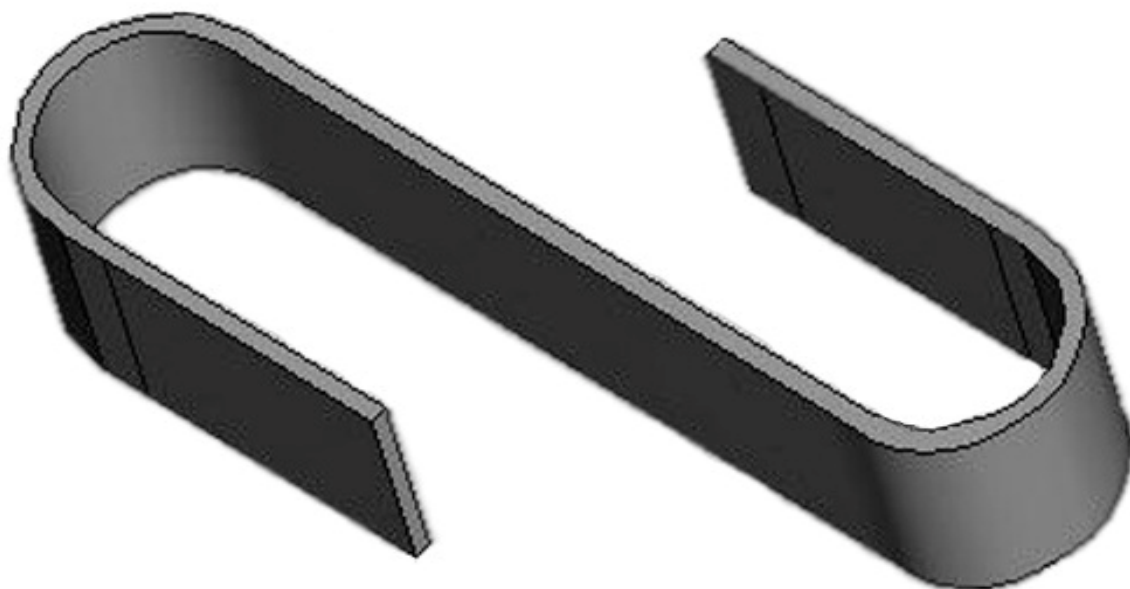
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.1 Способы размещения металлических нагревателей

Наибольшее распространение получили нагреватели из проволоки. Наиболее тяжелые условия работы у спиральных нагревателей при размещении их в полузакрытых пазах футеровки. В этом случае нижняя часть витков, соприкасающаяся с футеровкой, оказывается при более высокой температуре, чем весь нагреватель. Кроме того, у нагревателей из железохромалюминиевых сплавов в процессе работы наблюдается полегание витков, поэтому размещать их в пазах при температуре выше 1000°С не рекомендуется. Более перспективно размещение спиральных нагревателей на керамических трубках. При равных условиях средний срок службы нагревателей на трубках примерно на 20% выше, чем нагревателей на полочках. При размещении спиральных нагревателей на полочках и трубках отношение внешнего диаметра витка D к диаметру проволоки d рекомендуется брать в соответствии с таблицей 2.1.

Таблица 2.1.

Рекомендуемые отношения диаметра витка D к диаметру проволоки d .

Температура нагревателя, °С	Величина отношения D/d	
	для железохром- алюминиевых сплавов	для никель-хромовых сплавов
Нагреватели на керамических трубках		
Ниже 1000	6-12	6-14
1000-1300	6-10	6-12 (до 1200)
Выше 1300	5-7	-
В полузакрытых пазах футеровки		
Ниже 1000	6-10	6-10
1000-1200	5-6	5-9

Шаг намотки нагревателей следует брать в соответствии с рис. 2.2. Наиболее распространенным типом нагревателей в печах являются зигзагообразные нагреватели. Считается, что при равных условиях срок службы зигзагообразного нагревателя на 40% больше, чем у спирального на полочке. Зигзагообразный нагреватель может быть подвешен на штырях или крюках (рис.2.3) вертикально или размещен горизонтально с опорой на две крайние точки. В качестве материала для изготовления штырей и крючьев при

температуре до 1100°С может быть использован сплав Х25Н20С2. При температуре до 1200 – 1250°С используют сплавы ХН70Ю или ХН60Ю3.

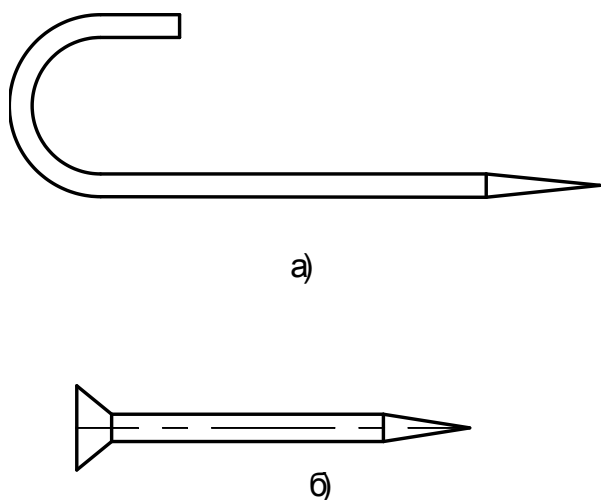


Рис.2.2 Крюк (1) и штырь (2) для подвески зигзагообразных нагревателей

2.2 Конструкция силитовых нагревателей

На рис.2.3 показано крепление силитового стержня в стенках печи.

Монтажные отверстия в печах должны быть выполнены по оси силитового стержня, во избежание поперечных нагрузок, наиболее опасных для силитовых нагревательных элементов.

Недопустим такой монтаж, когда активные зоны будут находиться в монтажных отверстиях. Кроме того, отверстия в корпусе печи должны иметь соответственно большой диаметр, чтобы не было прикосновения с нагревательными элементами. Токовые выводы нагревательного элемента опирается нижней своей частью на монтажную втулку из керамических материалов.

В любом случае, токовые выводы должны быть выставлены за пределы воротника втулки, на расстояние, превышающее двойной диаметр нагревательного элемента.

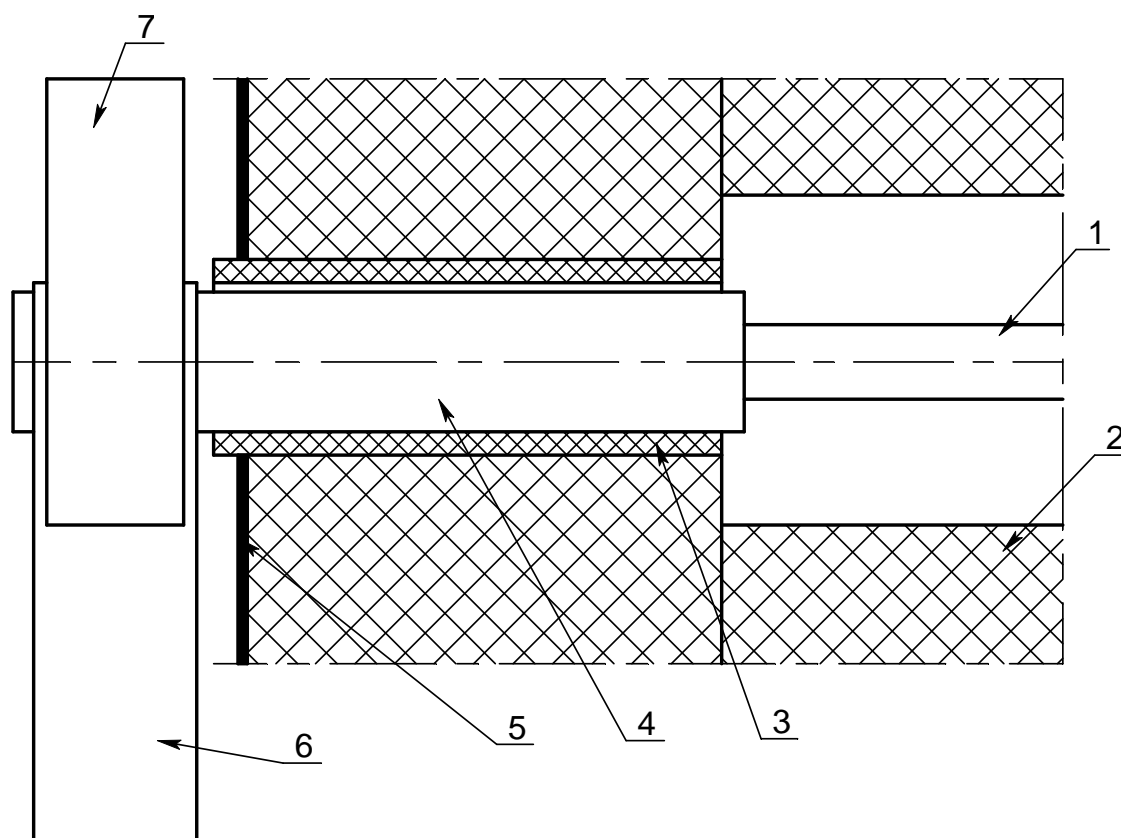


Рис .2.3 Крепление силитового стержня в стенках печи.

1- активная часть силитового стержня, 2- футеровка печи, 3- монтажная керамическая втулка, 4- токовый вывод стержня, 5- кожух печи, 6- лента токоподвода, 7- пружинный зажим.

Существуют различные способы соединения токовых выводов с проводами или шинами токоподводов. Крепление с помощью стального хомута наименее надёжно. Это объясняется тем, что коэффициент линейного расширения стали значительно больше чем силита. Поэтому в процессе разогрева усилие затяжки хомута ослабевает, сопротивление в зоне контакта стержня и хомута увеличивается, что приводит к прогрессивному разогреву хомута и его оплавлению.

Наиболее надёжными являются водоохлаждаемые стыковые соединения. Однако они сложны и дороги и применяются только для крупных нагревательных устройств.

Хорошие результаты даёт использование в качестве токоподвода многослойной алюминиевой ленты прижатой к токовому выводу стержня пружинным зажимом из жаропрочной стали (рис.2.4).

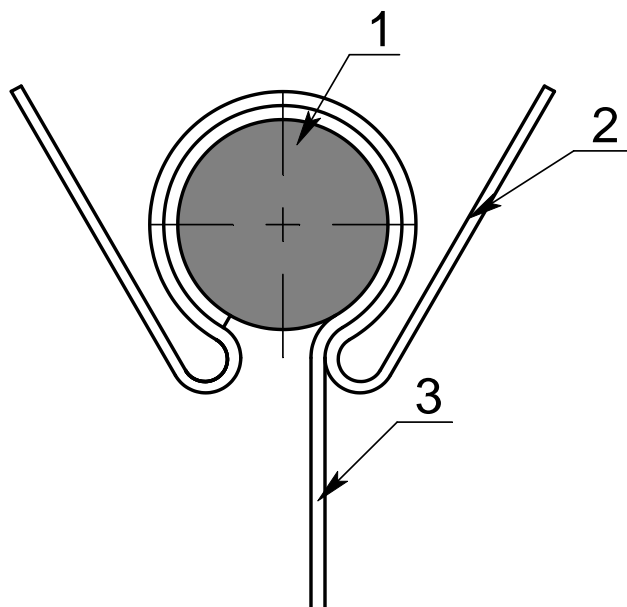


Рис. 2.4 Соединение силитового стержня с токоподводом с помощью пружинного зажима.

1-торец силитового стержня, 2- пружинный зажим, 3- многослойная алюминиевая лента.

На рис. 2.5 приведён пример расположения совокупности стержней в рабочем пространстве печи.

Минимальное расстояние между осями соседствующих нагревательных элементов В равняется их двойному диаметру, а от оси стержня до футеровки А– полуторному диаметру. Это создаёт возможность равномерного рассеивания энергии, выделяющейся в стержне, по всем направлениям и предотвратить его местный перегрев. Расстояние между силитовыми стержнями и садкой печи С должны быть достаточными для свободной загрузки и извлечения, но не менее 2-х диаметров стержня.

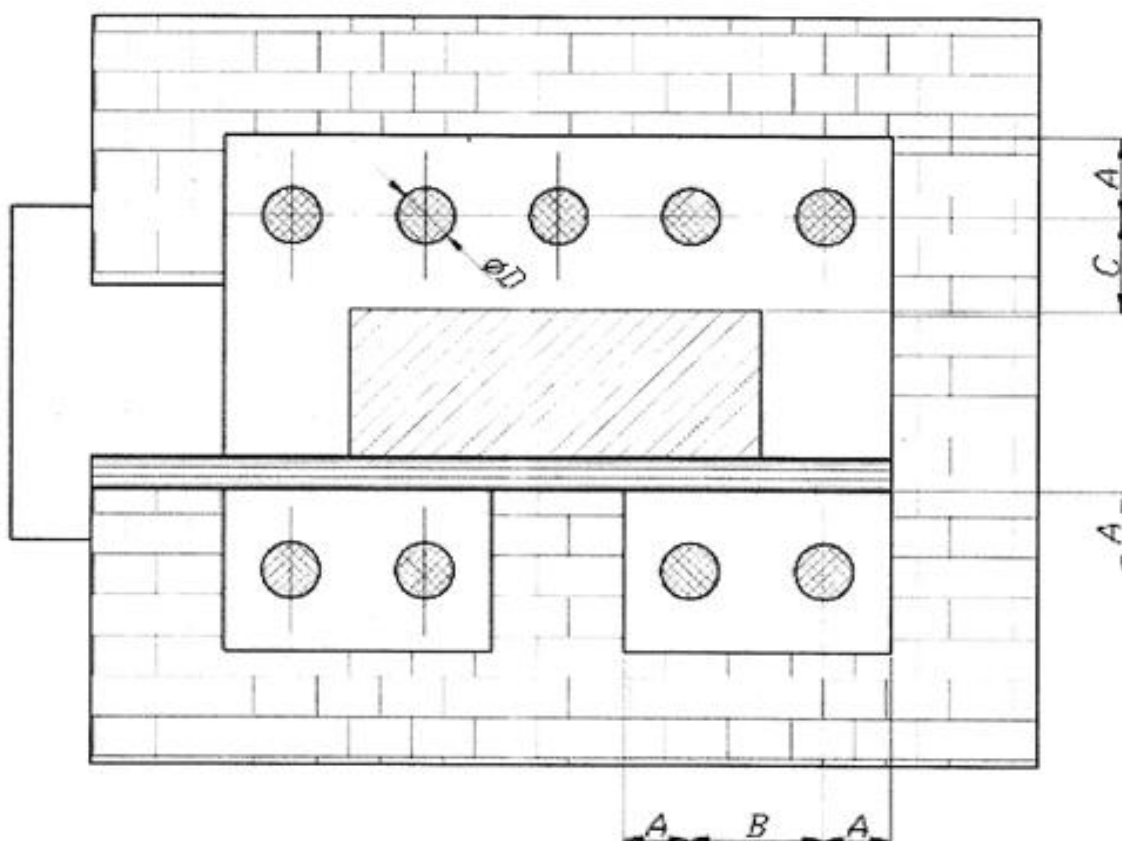


Рис. 2.5 Пример расположения совокупности стержней в рабочем пространстве печи.

3. Методика расчёта электронагревателей сопротивления.

Нагреватели сопротивления как металлические, так и силитовые мощностью до 6 кВт работают от однофазной сети. При мощности 10 и более кВт используют трёхфазный ток.

3.1 Расчёт электронагревателей сопротивления из жаростойких сплавов.

К расчету нагревателей обычно приступают после того, как выполнен расчет электротермического устройства (ЭТУ), в результате которого определяется необходимая мощность нагревателей и их максимальная температура, требуемая для проведения соответствующего технологического процесса (спекания, закалки, отпуска и т.п.), а также размеры рабочего пространства. Целью расчета нагревателей является определение сечения и

длины проволоки (ленты) для изготовления нагревателей и выбор марки сплава.

1. Расчет начинают с определения допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя $P_{доп.}$, которая определяется как мощность, выделяемая с единицы поверхности нагревателя.

Величина $P_{доп}$ при прочих равных условиях определяет температуру нагревателей, а следовательно, и срок его службы. Поскольку в реальных электротермических устройствах (ЭТУ очень трудно обеспечить одинаковые условия теплоизлучения по длине нагревателя, а также на различных стадиях работы ЭТУ, температура нагревателя оказывается неодинаковой как в целом, так и на отдельных его участках. При высоких температурах стремятся выбирать величину $P_{доп}$ минимальной, ибо в этом случае даже небольшие перегревы резко снижают срок службы нагревателя. Допустимую величину $P_{доп}$ либо берут из таблиц или графиков. В табл. 1 приведены допустимые величины удельной поверхностной мощности для наиболее распространённых сплавов.

Таблица 3.1

Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей поверхности

Температура тепловоспринимающей поверхности, °С	$P_{эф.}$ Вт/см ² при температуре нагревателя, °С					
	800	900	1000	1100	1200	1300
500	4,5	7,15	10,55	14,85	20,2	26,8
600	3,5	6,1	9,5	13,8	19,3	25,7
700	2	4,6	8,05	12,4	17,7	24,3
800	-	2,65	6,05	10,4	15,7	22,3
900	-	-	3,4	7,75	13	19,6
1000	-	-	-	4,3	9,7	16,25
1100	-	-	-	-	2,85	9,4
1200	-	-	-	-	-	6,55

Допустимая величина удельной поверхностной мощности нагревателей промышленных печей вычисляют по формуле:

$$P_{дон.} = P_{эф.} \cdot \alpha, \text{ где:} \quad (3.1)$$

$P_{эф.}$ - эффективная удельная поверхностная мощность, определяемая по таблице 3.1.

α - коэффициент эффективности излучения (принимается по таблице 3.2)

Таблица 3.2
Значения коэффициента эффективности излучения

Размещение нагревателя	Коэффициент α
Проволочные спирали в полузакрытых пазах	0,16-0,24
Проволочные спирали на трубках	0,3-0,36
Проволочные зигзагообразные	0,6-0,72
Ленточные зигзагообразные	0,56-0,7

2. Диаметр нагревателя круглого сечения в миллиметрах определяют по формуле:

$$d = 0,343 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{N}{U}\right)^2 \cdot (\rho_t / P_{дон.})}, \text{ мм где:} \quad (3.2)$$

N - мощность нагревателей, Вт;

U - напряжение нагревателей, В;

$\pi = 3,14$;

ρ_t - удельное сопротивление нагревательных элементов при различной температуре нагрева, вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot k, \text{ ,мкОм}^* \text{ м;} \quad (3.3)$$

где: ρ_{20} - удельное сопротивление нагревательных элементов при 20°C (определяют из таблицы 3.3).

Таблица 3.3
Удельное сопротивление сплавов при 20°С

Марки сплавов	Удельное сопротивление ρ_{20} при 20°С мкОм*м
X20H80-H	1,04-1,15
XH70Ю	1,15-1,35
X15H60	1,05-1,17
X15H60-H	1,04-1,17
X23Ю5Т	1,34-1,45

K - поправочный коэффициент, который можно принимать для жаростойких и жаропрочных сплавов в интервале температур от 20 до 1400°С равным 1,01÷1,1;

$P_{доп.}$ – допустимая удельная поверхностная мощность, Вт/см².

Полученное значение округляют до ближайшего диаметра проволоки, предусмотренного стандартом. Для низкотемпературных нагревателей округлять следует до ближайшего меньшего диаметра, а для нагревателей, работающих при высоких температурах до ближайшего большего.

3. Длину проволоки в метрах определяют по формуле:

$$L = 0,785 \cdot \left(\frac{U^2 \cdot d_{окр.}^2}{N \cdot \rho_t} \right), \text{ м где:} \quad (3.4)$$

$d_{окр.}$ - округлённое значение диаметра проволоки

2^а. Толщину в миллиметрах ленты нагревательного элемента прямоугольного сечения определяют по формуле: (3.5)

$$a = 0,368 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{N}{U}\right)^2 \cdot \frac{\rho_t}{P_{доп.} \cdot (1+m)}}, \text{ мм где:}$$

$m = b / a(5 \div 15)b$, b - ширина ленты нагревательного элемента, мм.

Полученное значение a и b округляют до ближайших значений, предусмотренных стандартом. Для низкотемпературных нагревателей округлять следует до ближайших меньших значений, а для нагревателей, работающих при высоких температурах до ближайших больших.

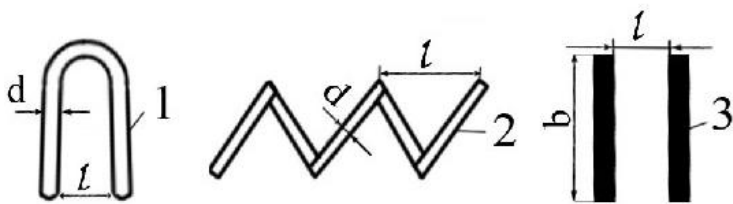
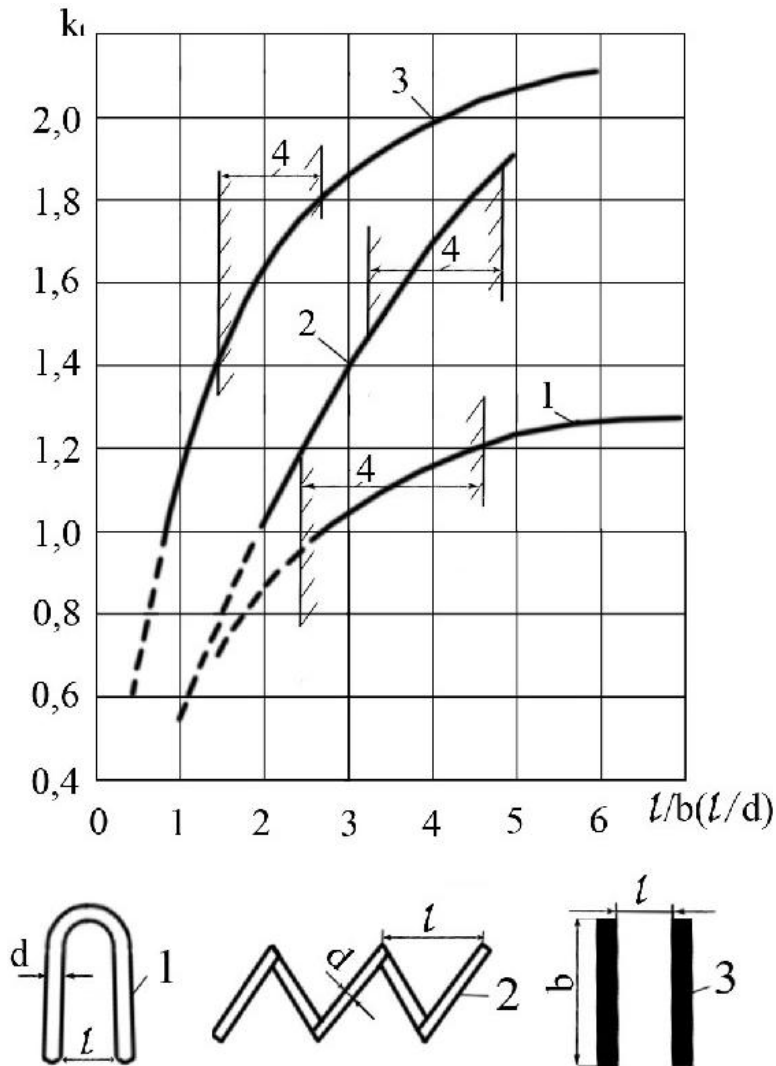


Рис.3.1 Зависимость коэффициента шага витка k_1 от диаметра проволоки или высота ленты. 1 – проволочный зигзагообразный нагреватель; 2 - проволочный спиральный нагреватель; 3 – ленточный зигзагообразный нагреватель; 4 – относительные межвитковые расстояния, оптимальные по эксплуатационному расходу материала.

3^a . Длина в метрах нагревателя, изготовленного из материала прямоугольного сечения с отношением сторон m , равна:

$$L = \frac{U^2 \cdot b \cdot a}{N \cdot \rho_t} \text{ , м} \quad (3.6)$$

4. Диаметр витков проволочного или ленточного нагревателей определяют по таблице 2.1.

5. Для определения шага витка нагревателя сначала определяют по рис. 3.1 коэффициент шага k_1 для вычисленного диаметра проволоки или ширины ленты.

Шаг витка l определяют по формуле: $l = k \cdot d$ для проволоки и $l = k \cdot b$ для ленточного нагревателя.

6. По рис. 3.2 определяют срок службы проволочного нагревателя диаметром 1 мм при заданной температуре τ^1 . Для принятого диаметра проволоки срок службы составит $\tau = \tau^1 \cdot d$, а для ленточного $\tau = 1,75 \cdot \tau^1$.

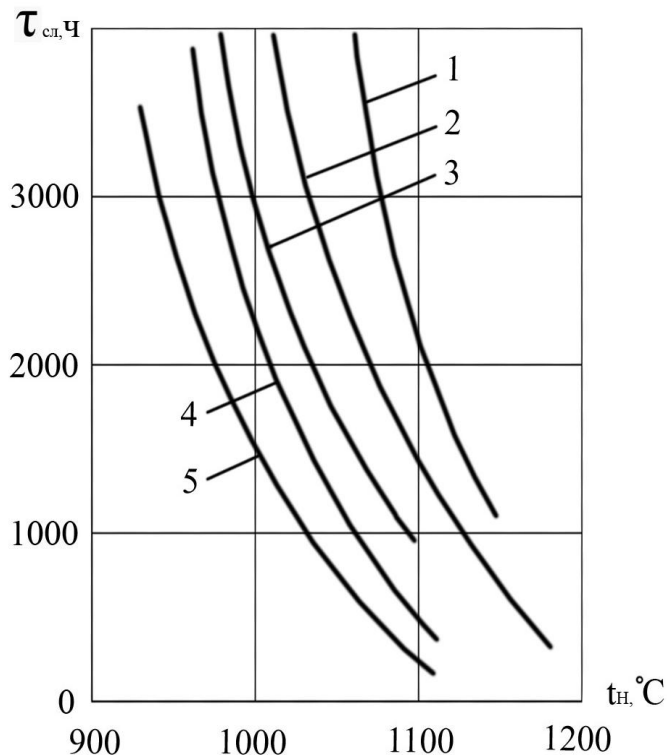


Рис.3.2 Срок службы нагревателя из проволоки диаметром 1 мм при заданной температуре нагревателя.
1 – X20H80-H; 2 – X20H80; 3 - X15H60-H; 4 – X25H20; 5 – X15H60.

3.2 Расчёт силитовых нагревателей сопротивления.

К расчету силитовых нагревателей также как металлических приступают после того, как выполнен расчет электротермического устройства (ЭТУ), в результате которого определяется необходимая мощность нагревателей и их максимальная температура, требуемая для проведения соответствующего технологического процесса (спекания, закалки, отпуска и т.п.), а также размеры рабочего пространства и толщина стенок печи.

Технология изготовления силитовых стержней не позволяет получать точно заданного сопротивления стержня. В большой партии силитовых стержней одного типоразмера величина электрического сопротивления может изменяться в пределах 10 и более процентов.

Кроме того, изготовление силитовых стержней по размерам заказчика обходится в несколько раз дороже, чем приобретение аналогичных стержней из серийно выпускаемых партий.

Заводы изготовители экспериментально определяют действительное сопротивление изготовленных стержней и записывают их величину на выводе стержня мелом. Обычно указывают также номинальное напряжение или ток. (Если номинальное напряжение не указано, его определяют по формуле:

$$U_1 = I \cdot R, \text{ В}).$$

Поэтому целью расчета является выбор размеров силитовых стержней, из каталога завода изготовителя, а для работы стержней в номинальном режиме используют многоступенчатые трансформаторы.

Порядок расчёта:

- а) исходными данными для расчёта являются: мощность печи, температура нагревателей, длина рабочего пространства и толщина футеровки печи;
- б) исходя из температуры нагревателя по графику на рис.3.3 определяют величину допустимой удельной мощности;
- в) вычисляют суммарную поверхность активной части стержней по формуле:

$$S = \frac{N}{P_{уд.}}, \text{ см}^2$$

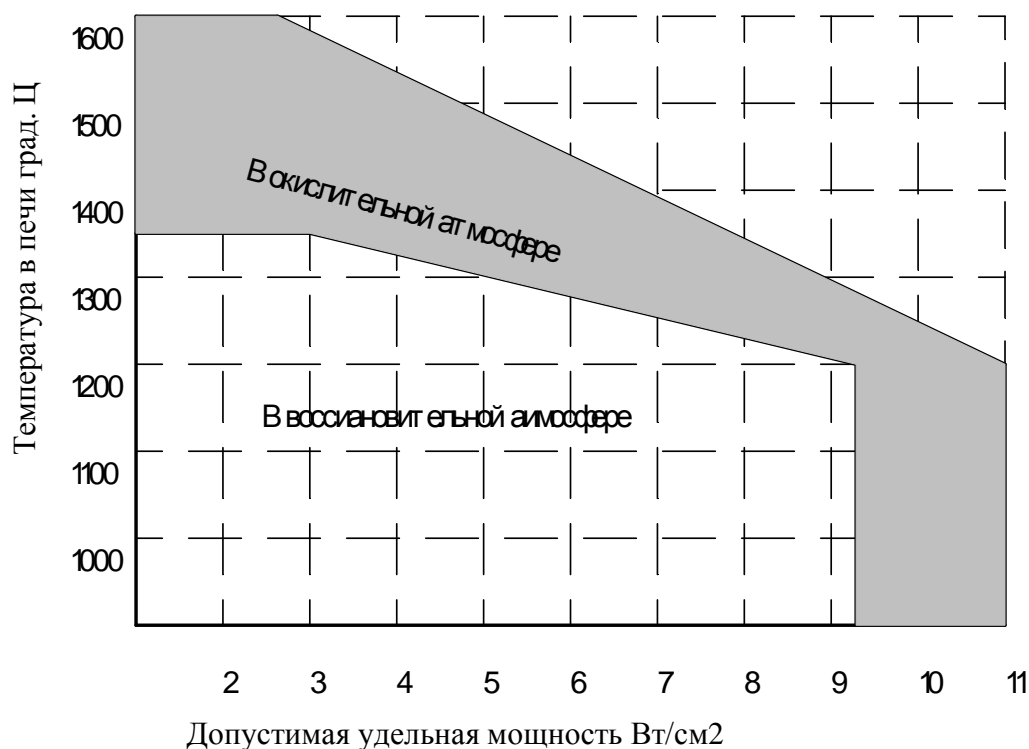


Рис.3.3 Допустимая удельная поверхностная мощность силовых нагревателей.

г) по каталогу изготовителя стержней выбирают стержни, длина активной части которых не превышает длину рабочего пространства печи, а длина токовых выводов больше толщины футеровки на 2...3 диаметра;

д) вычисляют площадь поверхности активной части одного выбранного стержня

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot L;$$

е) вычисляют расчётное количество стержней:

$$n_p = \frac{S}{S_1};$$

ж) округляют расчётное количество стержней до ближайшего большего целого числа, а при трёхфазной схеме соединения до ближайшего большего кратного трём;

з) для принятого числа стержней – $n_{пр}$. вычисляют удельную поверхностную мощность нагревателя и новое значение его допустимой температуры (по рис.3.3);

и) по номинальному напряжению на силовых стержней и характеристикам трансформатора выбирают схему соединения стержней в печи и их подключения к трансформатору.

3.2 Примеры расчёта электрических нагревателей сопротивления

3.2.1 Пример расчёта нихромового нагревателя.

а) Исходные данные для расчёта

- нагреватель предназначен для выплавки алюминиевых сплавов в тигле вместимостью 6 кг сплава;
- температура выдачи металла из печи - 900°C;
- материал нагревателя - нихромовая проволока Х20Н80;
- размещение спиралей в полузакрытых пазах футеровки;
- мощность нагревателя - 6 кВт;
- источник питания – трёхфазный трансформатор с 16-ю ступенями напряжения от 46 до 205 В .

б) По таблице 3.1 определяем эффективную удельную поверхностную мощность нагревателя. Для надёжной работы нагревателя принимаем его температуру на 50 °С ниже допустимой для проволоки марки Х20Н80, т.е. 1150°C. При температуре тепловоспринимающей поверхности равной 900 °С $P_{эфф.} = 10,34 \text{ Вт/см}^2$.

Для выбранного способа размещения нагревателя коэффициент эффективности излучения $\alpha = 0,2$. Поэтому допустимая удельная поверхностная мощность $P_{дон} = 10,34 \cdot 0,2 = 2,07 \text{ Вт/см}^2$.

в) Диаметр проволоки нагревателя определяем по формуле 3.2. Для этого в неё подставляем $\rho_{1150} = 1,1 \cdot 1,05 = 1,16 \text{ мкОм}^* \text{ м}$ (формула 3.3). Напряжение

на секциях нагревателей принимаем равным напряжению средней ступени трансформатора - 62В. Это обеспечивает возможность компенсировать возможную погрешность расчёта. Мощность одной секции равна 2кВт.

$$d = 0,343 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{2000}{62}\right)^2 \cdot (1,16 / 2,07)} = 2.7216 \text{ , мм}$$

Округлим полученное значение до ближайшей большей величины диаметра выпускаемой предприятиями проволоки - 3мм.

г) Длина проволоки в 1 секции нагревателя определяем по формуле 3.3.

$$L = 0,785 \cdot \left(\frac{62^2 \cdot 3^2}{2000 \cdot 1.16}\right) = 11.706 \text{ , м}$$

д) по графику на рис. 3.2 определяем срок службы нагревателя из нихромовой проволоки марки Х20Н80 диаметром 1мм при температуре 1150°С.

$\tau^1 = 750$ часов. Срок службы для нагревателя из проволоки диаметром 3мм будет:

$$\tau = \tau^1 \cdot 3 = 2250 \text{ , часов.}$$

3.2.2 Пример расчёта силитового нагревателя.

а) Исходные данные для расчёта

- нагреватель предназначен для выплавки медных сплавов в тигле вместимостью 12 кг сплава;
- температура выдачи металла из печи - 1200°С;
- мощность нагревателя - 8 кВт;
- источник питания – трёхфазный трансформатор с 16-ю ступенями напряжения от 46 до 205 В;
- длина рабочего пространства печи - 270 мм;
- толщина футеровки – 210 мм

б) По рис. 3.3 определяем допустимую удельную поверхностную мощность

для температуры $1200^0\text{C} \div P_{\text{уд.дон.}} = 10 \text{ Вт/см}^2$.

в) Суммарная площадь активной поверхности силитовых стержней должна быть:

$$S_{\text{сумм.}} = N / P_{\text{уд.доп.}} = 8000 \text{ Вт} \div 10 \text{ Вт/см}^2 = 800 \text{ см}^2.$$

г) На сайте ОАО «Подольскогнеупор» выбираем силитовые стержни марки 18x250x250, соответствующие длине рабочего пространства печи и толщине её футеровки. Диаметр активной поверхности стержня равен 18 мм, его сопротивление 1,5 Ом, номинальный ток 38 А.

Вычисляем номинальное напряжение на стержне $U_{\text{ст.}} = I \cdot R = 38 \cdot 1,5 = 46,05 \text{ В}$;

г) Площадь поверхности активной части стержня равна:

$$S_1 = 3,14 \cdot 1,8 \cdot 25 = 141,3 \text{ см}^2.$$

д) Суммарное количество стержней, обеспечивающих заданную мощность должно быть:

$$n_{\text{сумм.}} = S_{\text{сумм.}} \div S_1 = 5,66$$

Округлим число стержней до 6. Эта величина кратна трём, что позволяет применить трёхфазную схему подсоединения печи к источнику питания;

е) С учётом округления удельная поверхностная мощность будет равна:

$$P_{\text{уд.}} = 8000 \div (141,3 \cdot 6) = 9,437 \text{ Вт/см}^2.$$

При таком значении $P_{\text{уд.}}$ допустимая температура нагревателя может быть увеличена до 1250 °С, что сократит продолжительность плавки;

ж) Принимаем попарно последовательное соединение стержней «на звезду», приведённую на рис.3.4. Напряжение на каждой паре стержней должно быть равным 92,1В. Это соответствует 7 – 8 ступеням трансформатора, что позволит компенсировать возможные неточности расчёта переходом на смежные ступени напряжения трансформатора.

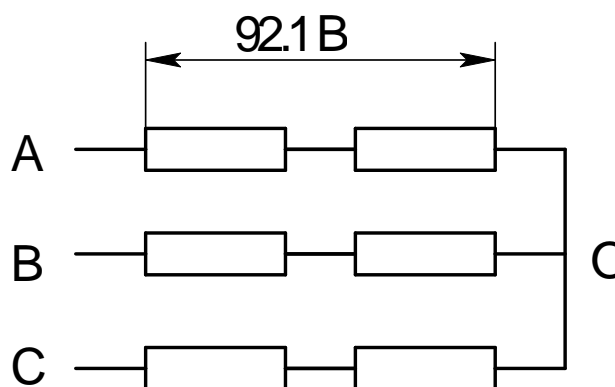


Рис. 3.4 Принятая схема соединения силитовых стержней в печи.

4. Вопросы для самоконтроля.

- сформулируйте закон Ома
- назовите материалы для электрических нагревателей сопротивления.
- перечислите способы размещения металлических нагревателей в рабочем пространстве печи.
- опишите способ размещения силитовых стержней в рабочем пространстве печи.
- в чём заключается трудность надёжного соединения токоподвода с силитовым стержнем?
- поясните способы этих соединений.
- что называют допустимой удельной поверхностной мощностью нагревательного элемента?
- как определяют эту величину?
- как изменяется удельное электрическое сопротивление металлических нагревательных элементов при увеличении их температуры?
- как изменяется удельное электрическое сопротивление силитовых стержней при увеличении их температуры?

5. Варианты индивидуальных заданий.

Мощность нагревателя, кВт	№ варианта при заданной температуре нагрева металла °С						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
6	1	2	3	4	5	6	7
9	8	9	10	11	12	13	14
12	15	16	17	18	19	20	21
15	22	23	24	25	26	27	28

6. Порядок выполнения задания

- изучить содержание методических указаний.
- ответить на вопросы для самоконтроля.
- пройти входной контроль в форме собеседования с преподавателем.
- получить индивидуальное задание для выполнения расчётов и построения графиков.
- выбрать и обосновать выбор материала нагревательного элемента;
- выполнить расчёт параметров нагревательных элементов для предложенных в задании параметров нагревателя;
- оформить отчёт в электронном виде для обсуждения с преподавателем.

Учебное издание

Маляров Аркадий Ильич
Солохненко Василий Васильевич
Алешин Михаил Александрович

**РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ
СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Под редакцией авторов

*Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом
МГТУ «МАМИ»*

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы
на 2011г.

Подписано в печать 16.11.11 формат 60x90 1/16. Бумага 80 г/м²
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 1.75.
Тираж 50 экз. Заказ №191-11

МГТУ «МАМИ»

107023, г.Москва, Б. Семёновская ул., 38