

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине
«Электротехнологические установки»
для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2024

УДК 621.783, 2001.63(075.8)

Составитель:
Савицкий В. В.

Рецензенты:
Козлов И. Е.,
гл. технолог СЗАО «Витебский машиностроительный завод «Новмаш»

Мовсесян В. Ю.,
начальник котельной «Южная», ст. преп. кафедры «Теплоэнергетика»
УО «ВГТУ»

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения»
УО «ВГТУ», протокол № 3 от 24.10.2024.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 2 от 30.10.2024.

Савицкий, В. В.

Электротехнологические установки : методические указания по выполнению курсовой работы / сост. В. В. Савицкий. – Витебск : УО «ВГТУ», 2024. – 23 с.

В методических указаниях рассмотрен порядок выполнения курсовой работы по расчёту электрических нагревателей электрических печей сопротивления, размещению в печном пространстве, выбору размеров футеровки печей, используемых при выполнении термической обработки материалов с целью изменения их свойств.

Рассчитаны на студентов, могут быть полезны инженерно-техническим работникам предприятий.

УДК 621.783, 2001.63(075.8)

© УО «ВГТУ», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Электрический расчёт нагревателей печи сопротивления	5
1.1 Общие сведения.....	5
1.2 Электрический расчёт нагревателей	6
1.3 Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов, определение размеров футеровки, размещение электрических нагревателей.....	16
1.4 Порядок выполнения работы	19
1.5 Требования к оформлению курсовой работы	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	21
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Пример оформления титульного листа курсовой работы...	22

ВВЕДЕНИЕ

Цель выполнения курсовой работы – развитие у студентов практических навыков самостоятельной работы с техническими регламентами, стандартами, справочной литературой, применение на практике навыков и знаний, полученных при изучении дисциплины.

Объём курсовой работы – одно задание, включающее выполнение расчётов определению параметров нагревателей электрических печей сопротивления, внешних габаритов печного пространства и выбору вариантов размещения нагревателей.

При выполнении индивидуального задания выполняется расчёт потребляемой электрической печью мощности, размеров и других геометрических параметров электрических нагревателей из проволочных или ленточных материалов, выполняется проверочный расчёт правильности выбора геометрических параметров нагревателей, выбирается способ их установки в печном пространстве, определяются размеры футеровки из огнеупорных и теплоизоляционных материалов, разрабатываются мероприятия по охране труда.

Курсовое проектирование по дисциплине «Электротехнологические установки» выполняется в соответствии с учебным планом подготовки студентов по специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» и Положением «О порядке организации курсового проектирования и защиты курсовых проектов (курсовых работ)» от 15.03.2024 г. № 116.

1 Электрический расчёт нагревателей печи сопротивления

1.1 Общие сведения

Электрические печи сопротивления (ЭПС) применяются для технологических операций в машиностроении, металлургии, легкой и химической промышленности, строительстве, коммунальном и сельском хозяйстве. Разнообразие материалов, обрабатываемых в ЭПС, и видов технологических процессов привело к большому разнообразию конструкций ЭПС, выпуску их малыми сериями и даже в индивидуальном порядке.

Печь сопротивления представляет собой футерованную камеру, где тепло выделяется в нагревателе. Такие печи называют камерными и используют, например, для выполнения различных видов термической обработки металлических деталей.

В технологических процессах, проводимых в ЭПС, используется нагрев посредством электричества. В ряде случаев используется возможность нагрева в вакууме или защитных газах. Поэтому далее рассматриваются общие принципы построения камерных печей, а также конструкция электрических нагревателей, способы их установки в печном пространстве, порядок монтажа футеровки из огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

Электрические печи сопротивления по способу превращения электрической энергии в тепловую разделяются на печи косвенного действия и установки прямого нагрева.

В ЭПС косвенного действия электрическая энергия превращается в тепловую в специальных нагревателях, а затем передается в рабочее пространство посредством теплопроводности, конвекции и излучения. В ЭПС прямого действия нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь. Нагревательные элементы в печах косвенного действия и нагреваемые тела, включаемые в цепь ЭПС прямого действия, могут быть проводниками первого и второго родов.

По уровню достигаемых температур ЭПС можно разделить на низкотемпературные (600–650 °С), среднетемпературные (1200–1250 °С) и высокотемпературные (выше 1250 °С).

У низкотемпературных ЭПС процессы теплообмена идут со значительной или даже преобладающей ролью конвекции. Низкотемпературные печи часто называют конвекционными печами. Для интенсификации процесса теплопередачи низкотемпературные печи обычно снабжают вентилятором, и нагреватель иногда размещается в отдельной камере. Эта камера связана с основной камерой каналами для циркуляции воздуха.

В средне- и высокотемпературных печах теплообмен внутри печи осуществляется в основном излучением, а доля конвективного теплообмена незначительна. Печи с преобладающим лучистым теплообменом иногда называют радиационными.

Среднетемпературные печи имеют верхнюю температурную границу 1250 °С, определяемую возможностью применения для нагревательных элементов специальных сплавов.

Технологическое применение этих печей весьма обширно. В них осуществляют процессы закалки, нормализации, отжига, термохимическую обработку черных металлов, нагрев под обработку давлением черных и цветных металлов и т. д.

В печах с контролируемой атмосферой применяются инертные газы, а также специальные газовые смеси, назначение которых – термохимическая обработка поверхности изделий – азотирование, цементация и нитроцементация, проводимые с целью повышения поверхностной прочности и износостойчивости деталей.

По способу обработки изделий ЭПС разделяют на печи периодического действия (садочные печи) и печи непрерывного действия (методические).

1.2 Электрический расчёт нагревателей

Цель электрического расчёта заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей (по фазам) в соответствии с требуемым сопротивлением для выделения необходимой мощности, а также от условий теплообмена между нагревателями и нагреваемыми изделиями.

Обычно в качестве исходных данных для расчёта нагревателей электрических печей выступают мощность, которую должны обеспечивать нагреватели, максимальная температура, требуемая для осуществления соответствующего технологического процесса (отпуска, закалки деталей, спекания порошковых материалов и т. д.), и размеры рабочего пространства электрической печи. Если мощность печи не задана, её можно определить по эмпирическому правилу.

При выполнении расчётов использованы данные, изложенные в источниках [1–3].

В ходе расчёта нагревателей требуется получить диаметр и длину (для проволоки) или размеры сечения (ширину и толщину) и длину (для ленты), которые необходимы для изготовления нагревателей, а также определить их геометрические параметры для размещения внутри рабочего пространства печи. Необходимо также выбрать материал, из которого будут изготовлены нагреватели.

Пусть в качестве материала для нагревателей рассматривается хромоникелевый прецизионный сплав в виде проволоки с высоким электрическим сопротивлением – нихром Х20Н80, который является одним из самых популярных материалов, применяемых при изготовлении нагревательных элементов.

Марки других материалов с высоким электрическим сопротивлением (нихромы и фехрали) приведены в ГОСТах [4–5]. В этих стандартах указано также примерное назначение сплавов и основные технические характеристики.

Исходя из потребностей в тепловой обработке изделий, рассчитывают полезный объём камеры внутри печи. Объём внутреннего пространства печи рассчитывают в соответствии с размерами изделий и заготовок, подлежащих термической обработке с целью изменения их свойств. Их определяют по вариантам индивидуальных заданий, которые приведены в задании на курсовое проектирование. Кроме этого, используя знания по материаловедению и справочную литературу, по заданному виду термической обработки находят режимы её выполнения (интервалы температуры). Температурный режим термической обработки необходим для определения допустимого значения поверхностной мощности нагревателей, превышение которого вызывает их преждевременный выход из строя.

При расчёте размеров внутреннего пространства печи следует учитывать размеры заготовок или деталей, которые подвергают заданной термической обработке, а также расстояние от стенок и свода печи до них. Минимальное расстояние от стенок печи до заготовок следует принимать равным 100–150 мм, от свода печи до заготовок – не менее 200 мм. При этом количество одновременно термически обрабатываемых заготовок должно быть таким, чтобы обеспечивался коэффициент загрузки объёма печи не более 40 %. Пусть в качестве примера заданы размеры внутреннего пространства печи: высота $h = 490$ мм, ширина $b = 350$ мм и глубина $l = 350$ мм, а нагреватель представляет собой проволоку, диаметр которой определится после выполнения его расчёта с округлением до ближайшего стандартного значения.

Для заданных размеров объём печи равен:

$$V = h \cdot d \cdot l = 490 \cdot 350 \cdot 350 = 60 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 = 60 \text{ л.}$$

Далее необходимо определить мощность, которую должна выдавать печь. Мощность измеряется в Ваттах (Вт) и определяется *по эмпирическому правилу: для электрической печи объёмом 10–50 литров удельная мощность составляет 100 Вт/л (Ватт на литр объёма), объёмом 100–500 литров – 50–70 Вт/л.* Возьмём для рассматриваемой печи удельную мощность 100 Вт/л. Таким образом мощность нагревателя электрической печи должна составлять:

$$P = 100 \cdot 60 = 6000 \text{ Вт} = 6 \text{ кВт.}$$

При мощности 5–10 кВт нагреватели изготавливают, обычно, однофазными. При бóльших мощностях для равномерной загрузки сети нагреватели включают в сеть трёхфазного тока.

Затем нужно найти силу тока, проходящего через нагреватель $I = P / U$, где P – мощность нагревателя, U – напряжение на нагревателе (между его концами), и сопротивление нагревателя $R = U / I$.

При выборе питающего нагреватель напряжения может быть два варианта подключения его к электрической сети:

1 – к бытовой сети однофазного тока, для которой напряжение U равно 220 В;

2 – к промышленной сети трехфазного тока – напряжение U 220 В (между нулевым проводом и фазой) или напряжение U составляет 380 В (между двумя любыми фазами).

В рассматриваемом случае питающее напряжение составляет 220 В. Определяют силу тока, протекающая через нагреватель $I = P / U = 6000 / 220 = 27,3$ А.

Затем определяют сопротивление нагревателя печи – $R = U / I = 220 / 27,3 = 8,06$ Ом и составляют схему подключения нагревателя в питающей сети. Схема подключения показана на рисунке 1.1.

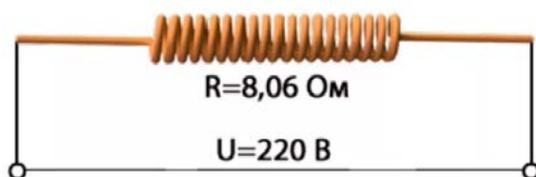


Рисунок 1.1 – Проволочный нагреватель в сети однофазного тока

При потребляемой мощности печи более 10 кВт возможны следующие варианты подключения нагревателей. Для промышленной сети трехфазного тока нагрузка распределяется равномерно на три фазы, т. е. по $6000 / 3 = 2000$ Вт на фазу. Таким образом, нам требуется 3 нагревателя.

Далее необходимо выбрать способ подключения непосредственно нагревателей (нагрузки). Способов может быть два – «Звезда» или «Треугольник». Стоит заметить, что в данной работе формулы для расчёта силы тока (I) и сопротивления (R) для трёхфазной сети записаны в упрощённом виде.

При подключении типа «Звезда» нагреватель подключается между фазой и нулем (см. рис. 1.2).

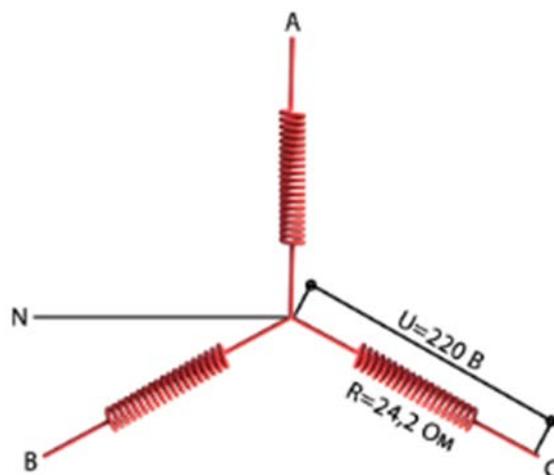


Рисунок 1.2 – Проволочный нагреватель в сети трёхфазного тока с подключением по схеме «Звезда»

Соответственно, напряжение на концах нагревателя будет $U = 220$ В.
 Ток, проходящий через нагреватель – $I = P / U = 2000 / 220 = 9,10$ А.
 Сопротивление одного нагревателя – $R = U / I = 220 / 9,10 = 24,2$ Ом.
 При подключении типа «Треугольник» нагреватель подключается между двумя фазами (см. рис. 1.3).

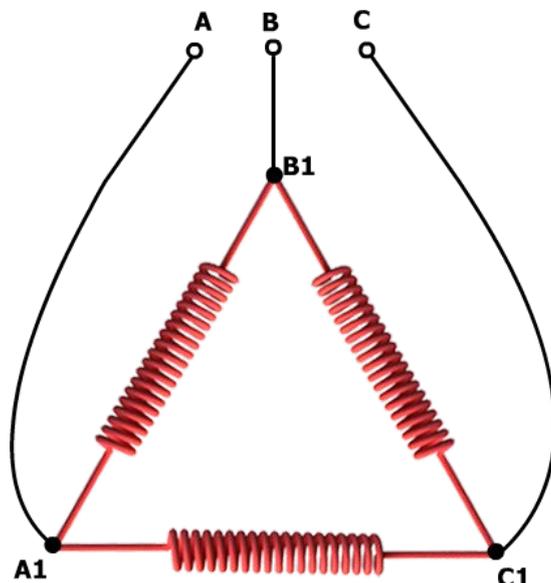


Рисунок 1.3 – Проволочный нагреватель в сети трёхфазного тока с подключением по схеме «Треугольник»

Соответственно, напряжение на концах нагревателя будет – $U = 380$ В.
 Ток, проходящий через нагреватель – $I = P / U = 2000 / 380 = 5,26$ А.
 Сопротивление одного нагревателя – $R = U / I = 380 / 5,26 = 72,2$ Ом.
 После определения сопротивления нагревателя при соответствующем подключении к электрической сети необходимо подобрать диаметр и длину проволоки.

При определении диаметра и длины необходимо анализировать удельную поверхностную мощность нагревателя, т. е. мощность, которая выделяется с единицы площади боковой поверхности.

Поверхностная мощность нагревателя зависит от температуры нагреваемого материала и от конструктивного исполнения нагревателей.

Для каждого материала в зависимости от требуемой температуры нагрева определяют *допустимое значение поверхностной мощности*. Это значение может определяться с помощью специальных таблиц или номограмм.

В данных расчётах используются таблицы, приведенные ниже.

Для *высокотемпературных печей* (при температуре более 700–800 °С) допустимая поверхностная мощность, Вт/м², равна $\beta_{дон} = \beta_{эф} \cdot \alpha$, где $\beta_{эф}$ – поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры теплопринимающей среды (Вт/м²), α – коэффициент эффективности

излучения. Значение коэффициента $\beta_{эф}$ выбирают по таблице 1.1, α – по таблице 1.2.

Если печь низкотемпературная (температура менее 200–300 °С), то допустимую поверхностную мощность можно считать равной $(4–6) \cdot 10^4$ Вт/м².

Таблица 1.1 – Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды

Температура тепловоспринимающей поверхности, °С	$\beta_{эф}$, Вт/см ² при температуре нагревателя, °С											
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5	14,15	16,4	19,0	21,8	24,9	28,4	36,3
200	5,9	7,15	8,55	10,15	12,0	14,0	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1
300	5,65	6,85	8,3	9,9	11,7	13,75	16,0	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8
400	5,2	6,45	7,85	9,45	11,25	13,3	15,55	18,1	20,9	24,0	27,45	35,4
500	4,5	5,7	7,15	8,8	10,55	12,6	14,85	17,4	20,2	23,3	26,8	34,6
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5	11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05	10,0	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2
800	-	1,25	2,65	4,2	6,05	8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2
850	-	-	1,4	3,0	4,8	6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21,0	29,0
900	-	-	-	1,55	3,4	5,45	7,75	10,3	13	16,2	19,6	27,6
950	-	-	-	-	1,8	3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26,0
1000	-	-	-	-	-	2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2
1050	-	-	-	-	-	-	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2
1100	-	-	-	-	-	-	-	2,55	5,35	8,5	12,0	19,8
1150	-	-	-	-	-	-	-	-	2,85	5,95	9,4	17,55
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,15	6,55	14,55
1300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,95

Таблица 1.2 – Значение коэффициента эффективности излучения

Размещение нагревателей	Коэффициент α
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки	0,16–0,24
Проволочные спирали на полочках в трубках	0,30–0,36
Проволочные зигзагообразные (стержневые) нагреватели	0,60–0,72
Ленточные зигзагообразные нагреватели	0,38–0,44
Ленточные профилированные (ободовые) нагреватели	0,56–0,7

Варианты размещения нагревателей, приведенные в таблице, поясняются на рисунках 1.2.

Предположим температура нагревателя при нормальной его работе равна 1000 °С и должна обеспечить нагрев заготовки до температуры 700 °С. По таблице 1.1 подбирают $\beta_{эф} = 8,05$ Вт/см², по таблице 1.2 $\alpha = 0,2$, $\beta_{дон} = \beta_{эф} \cdot \alpha = 8,05 \cdot 0,2 = 1,61$ Вт/см² = $1,61 \cdot 10^4$ Вт/м².

После определения допустимой поверхностной мощности нагревателя находят его диаметр (для проволочных нагревателей) и длину, а для ленточных нагревателей – ширину и толщину ленты, а также её длину.

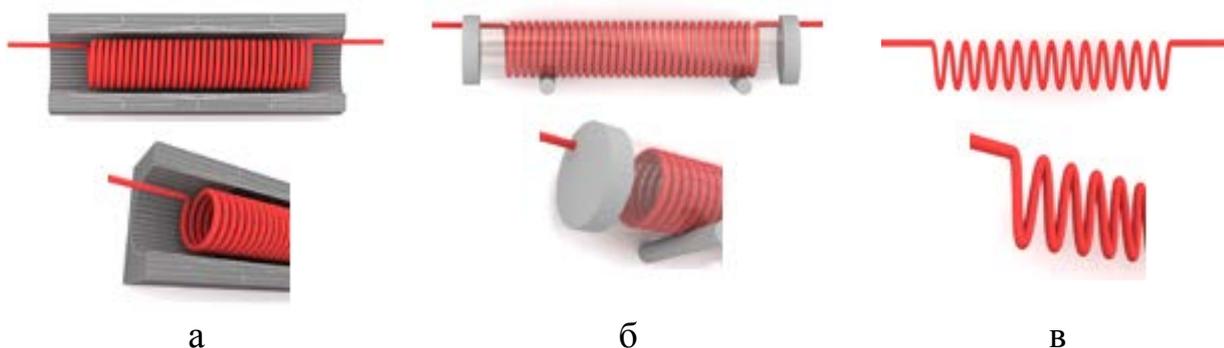


Рисунок 1.4 – Варианты размещения нагревателей:
 а – проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки;
 б – проволочные спирали на полочках в трубках; в – зигзагообразные (стержневые) нагреватели

Диаметр проволоки можно определить по следующей формуле:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot \beta_{\text{доп.}}}}, \quad (1.1)$$

где d – диаметр проволоки, (м); P – мощность нагревателя, (Вт); U – напряжение на концах нагревателя, (В); $\beta_{\text{доп.}}$ – допустимая поверхностная мощность нагревателя, (Вт/м²); ρ_t – удельное сопротивление материала нагревателя при заданной температуре, (Ом·м).

$\rho_t = \rho_{20} \cdot k$, где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя при 20 °С, (Ом·м), k – поправочный коэффициент для расчета изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры [5].

Длину проволоки можно определить по следующей формуле:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{\text{доп.}}^2}}, \quad (1.2)$$

где l – длина проволоки, (м).

Используя приведенные формулы определяют диаметр и длину проволоки из нихрома Х20Н80 для бытовой сети однофазного тока. Удельное электрическое сопротивление материала нагревателя составляет $\rho_t = \rho_{20} \cdot k = 1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 1,025 = 1,15 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Для печи объемом 60 литров печи, подключенной к бытовой сети однофазного тока, из предыдущих этапов расчета известно, что мощность

составляет $P = 6000$ Вт, напряжение на концах нагревателя – $U = 220$ В, допустимая поверхностная мощность нагревателя $\beta_{\text{доп}} = 1,6 \cdot 10^4$ Вт/м². Тогда расчётное значение диаметра равно:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 6000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00279 \text{ м} \approx 2,79 \text{ мм.}$$

Полученный размер необходимо округлить до ближайшего большего стандартного значения. Стандартные размеры для проволоки из нихрома и фехрали приведены в таблице 8 Приложения 2 [5]. В данном случае ближайшим большим стандартным размером является диаметр 2,8 мм. Таким образом, диаметр нагревателя $d = 2,8$ мм.

Длина нагревателя:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{\text{доп}}^2}} = \sqrt[3]{\frac{6000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx 42,81 \approx 43 \text{ м.}$$

Иногда требуется определить массу необходимого количества проволоки для изготовления нагревателя:

$$m = l \cdot \mu, \quad (1.3)$$

где m – масса отрезка проволоки, (кг); l – длина проволоки, (м); μ – удельная масса (масса 1 метра проволоки), (кг/м).

В рассматриваемом случае масса нагревателя:

$$m = 43 \cdot 0,052 = 2,3 \text{ кг.}$$

Данный расчет даёт минимальный диаметр проволоки, при котором она может быть использована в качестве нагревателя при заданных условиях.

С точки зрения экономии материала такой расчет является оптимальным. При этом также может быть использована проволока бóльшего диаметра, но тогда её количество возрастёт.

После выполнения расчётов проводят проверку их правильности.

Результаты расчета могут быть проверены следующим способом.

Был получен диаметр проволоки 2,8 мм.

Тогда требуемая длина составит $l = R / (\rho \cdot k) = 8,06 / (0,179 \cdot 1,025) = 43$ м, где l – длина проволоки, (м); R – сопротивление нагревателя, (Ом); ρ – номинальное значение электрического сопротивления 1 м проволоки, (Ом/м); k – поправочный коэффициент для расчёта изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры (см. выше).

Данное значение совпадает со значением, полученным в результате расчёта.

Далее необходимо проверить, не превысит ли поверхностная мощность выбранного нагревателя допустимую поверхностную мощность, которая была найдена: $\beta = P / S = 6000 / (3,14 \cdot 4300 \cdot 0,28) = 1,59$ Вт/см². Полученное значение $\beta = 1,59$ Вт/см² не превышает $\beta_{\text{доп}} = 1,6$ Вт/см².

Таким образом, для нагревателя потребуется 43 метра нихромовой проволоки Х20Н80 диаметром 2,8 мм, что составляет 2,3 кг.

С помощью расчёта можно найти диаметр и длину проволоки, необходимой для изготовления нагревателей печи, подключенной к сети трехфазного тока. Пусть нагреватели печи подключены по типу «Звезда», при котором нагреватель включается между фазой и нулём (рис. 1.2).

Как описано выше, на каждый из трех нагревателей приходится по 2 кВт мощности. Необходимо определить диаметр, длину и массу одного нагревателя.

Для расчёта диаметра проволоки используют формулу (1.1), подставляя значения в которую получают:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00134 \text{ м} \approx 1,34 \text{ мм.}$$

Ближайшим бóльшим стандартным размером проволоки для изготовления нагревателя является диаметр 1,4 мм.

Длина одного нагревателя рассчитывается по формуле (1.2) и, подставляя значения в которую, получают:

$$l = \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} (1,6 \cdot 10^4)}} \approx 29,69 \approx 30 \text{ м.}$$

Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 30 \cdot 0,013 = 0,39$ кг.

Проверка правильности расчёта состоит в определении потребной длины проволоки диаметром 1,4 мм, которая составит $l = R / (\rho \cdot k) = 24,2 / (0,714 \cdot 1,025) = 33$ м. Данное значение практически совпадает со значением, полученным в результате предыдущего расчета. При этом поверхностная мощность составит $\beta = P / S = 2000 / (3,14 \cdot 3000 \cdot 0,14) = 1,52$ Вт/см². Полученное значение меньше допустимого.

Для трёх нагревателей, подключенных по схеме «Звезда», потребуется $l = 3 \cdot 30 = 90$ м проволоки, что составляет по массе $m = 3 \cdot 0,39 = 1,2$ кг.

Возможен вариант подключения нагревателей печи в сеть трехфазного тока по схеме «Треугольник» (рис. 1.3).

Учитывая значение напряжения на концах нагревателей при такой схеме подключения, определяют диаметр проволоки для изготовления каждого нагревателя:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 380^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00093 \text{ м} \approx 0,93 \text{ мм.}$$

Ближайшим бóльшим стандартным размером является диаметр 0,95 мм, который принимают в качестве диаметра нагревателя ($d = 0,95$ мм). При расчёте длины одного нагревателя получают $l = 43$ м. Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,006 = 0,258$ кг.

Сравнение двух рассмотренных выше вариантов подключения нагревателей к сети трехфазного тока показывает, что при использовании схемы «Звезда» требуется проволока бóльшего диаметра, чем для схемы подключения «Треугольник», чтобы обеспечить заданную мощность печи

6 кВт. При этом нихромовой проволоки при подключении по схеме «Звезда» потребуется меньшей длины, чем при подключении нагревателей по схеме «Треугольник», однако массы проволоки, наоборот, необходимо больше.

При расчёте ленточного нагревателя определяют толщину a , ширину ленты b и длину ленточного нагревателя L (в м) в зависимости от способа его подключения к питающей сети.

При расчёте толщины ленты используют формулу:

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t \cdot 10^6 \cdot P^2}{2 \cdot m \cdot (m + 1) \cdot U^2 \cdot \beta_{\text{доп.}}}}, \quad (1.4)$$

где $m = b/a$ – кратность сторон сечения ленты, в соответствии с сортаментом выпускаемой ленты $m = (5-15)$, где b – ширина ленты, м; наиболее распространена лента с $m = 10$.

Рекомендуемый сортамент проволоки и лент:

$b \times a \geq 0,01 \times 0,001$ м для нагревательных элементов с температурой t_H до 1000 °С;

$b \times a \geq 0,02 \times 0,002$ м для нагревательных элементов с температурой t_H свыше 1000 °С.

Остальные обозначения соответствуют приведенным выше в формуле (1.1) для расчёта диаметра проволочного нагревателя.

Длина ленты каждой фазы L_ϕ при подключении нагревателя по схеме «Звезда» определяют по формуле:

$$L_\phi = \frac{a \cdot b \cdot R_\phi}{\rho_t}, \quad (1.5)$$

где R_ϕ – расчётное электрическое сопротивление фазы ветви, Ом, которое может быть найдено из зависимости:

$$R_\phi = \frac{U_\phi^2}{P_\phi}. \quad (1.6)$$

Затем выполняют проверку, определяя поверхностную мощность нагревателя ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и сравнивают её с допустимой:

$$\beta = \frac{P_\phi \cdot 10^3}{2 \cdot (a + b) \cdot L_\phi}. \quad (1.7)$$

Если рассчитанное значение окажется меньше допустимого, расчёт выполнен верно.

При эксплуатации нагревателей основной задачей становится размещение нагревателей расчетной длины в ограниченном пространстве печи. Нихромовая и фехрелевая проволока подвергаются навивке в виде спиралей или сгибанию в форме зигзагов, лента чаще сгибается в форме зигзагов, что позволяет вместить в рабочую камеру большее количество материала (по длине). Наиболее распространенным вариантом изготовления нагревателей является спираль.

Соотношения между шагом спирали и её диаметром и диаметром проволоки выбирают таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить достаточную их жесткость, в максимально возможной степени исключить локальный перегрев витков самой спирали и в то же время не затруднить теплоотдачу от них к изделиям.

Чем больше диаметр спирали и чем меньше её 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 увеличением частоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование её поверхности, а также могут возникнуть местные перегревы.

Практикой установлены рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки (d), шагом (t) и диаметром спирали (D) для проволоки диаметром от 3 до 7 мм. Эти соотношения следующие: $t \geq 2d$ и $D = (7/10) \cdot d$ – для нихромовой проволоки и $D = (4/6) \cdot d$ – для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов, таких как фехраль и т. п. Для более тонкой проволоки соотношение D и d , а также шаг проволоки t обычно берут большими.

Геометрические размеры элементов электрических зигзагообразных нагревателей в виде ленты или проволоки принимаются в соответствии с рисунком 1.6 и приведенными ниже соотношениями:

t – шаг спирали (зигзага), м:

$t \geq (2...5) b$ – для ленточного зигзага;

b – ширина ленты, м;

R – радиус закругления зигзага, м:

$R = (4...5) a$ – для ленточного;

a – толщина ленты, м;

H – высота зигзага, м:

$H = 0,15...0,3$ – для хромоалюминиевых сплавов;

$H = 0,2...0,4$ – для нихромов.

:

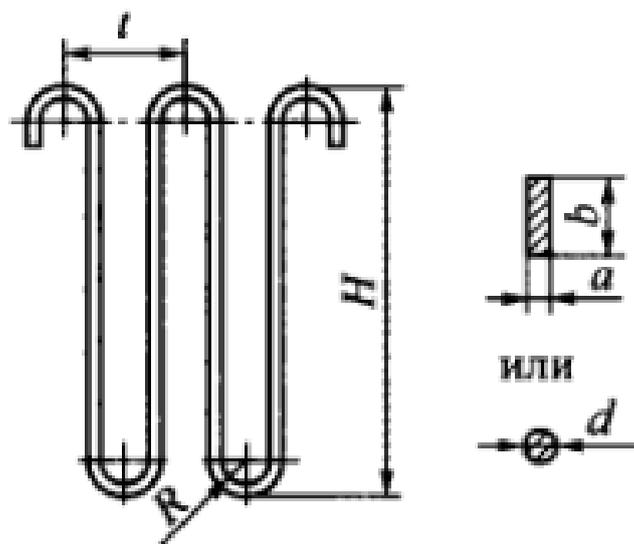


Рисунок 1.5 – Ленточный нагреватель и его параметры

Таким образом, расчёт нагревателей не ограничивается выбором их размеров. Необходимо также определить материал тип нагревателя (проволочный или ленточный), способ расположения нагревателей и другие особенности. Если нагреватель изготавливается в виде спирали, то необходимо определить количество витков и шаг между ними, для ленточных нагревателей определяют шаг, высоту зигзага и определяют длину всех зигзагов. Затем, с учётом найденных габаритных размеров внутреннего пространства печи, следует разместить полученную спираль в печи, используя один из вариантов, показанных на рисунке 1.4. Для этого определяют длину спирали или число витков зигзага ленточного нагревателя, которые должны размещаться в печи, количество спиралей и длину витков зигзага ленточного нагревателя в объёме печного пространства, которые должны располагаться симметрично на боковых стенках внутреннего пространства печи. При необходимости нагреватели располагают на поде и своде электропечи на равном расстоянии друг от друга, чтобы обеспечивался равномерный тепловой поток от каждого нагревателя и они не оказывали друг на друга экранирующее воздействие.

1.3 Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов, определение размеров футеровки, размещение электрических нагревателей

Электропечь сопротивления – камера, стены которой выложены огнеупорным и теплоизолирующим материалами. Огнеупорный слой выполняет следующие функции:

- формирует рабочее пространство печи сопротивления;
- несет нагреватели и загружаемые в камеру изделия;
- изолирует рабочее пространство от внешней среды;

– уменьшает потери теплоты от нагревателей.

Основным огнеупорным сырьем для электропечей являются следующие материалы:

- шамот;
- динас;
- хромомagnesит.

Футеровка печей и тепловых агрегатов создаётся по примерам уже надёжно работающей теплоизоляции в аналогичных условиях эксплуатации. Её задача снизить температуру зоны нагрева до искомой температуры внешнего слоя обечайки (корпуса печи) – не более 60 °С, или другой проектной. Она может быть одно- или многослойной, но толщина слоёв выбранных огнеупорных и теплоизоляционных материалов снижает температуру нагрева до необходимой.

Температуру окружающей среды для расчётов принимают равной +20 °С.

Футеровку печи можно выполнять однослойной из огне- или кислотоупорного материала или многослойной, внутренний слой – из огне- или кислотоупорного материала, наружный слой – из теплоизоляционных материалов: шамота-легковеса, асбестового листа или засыпки и т. д. Если температура на границе слоя из огнеупорного и теплоизоляционного слоев выше допустимой температуры для диатомового материала, то теплоизоляционный слой футеруют шамотом-легковесом.

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 желательнее 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.

Марку материалы огнеупорного слоя футеровки и рекомендуемые температуры применения следует выбирать в соответствии с ГОСТом [6].

Толщину слоя огнеупорной футеровки выбирать в соответствии с данными, приведенными в таблице 1.3.

Форму и размеры изделий из огнеупорных материалов рекомендуется выбирать по ГОСТу [7]. Затем необходимо определить расположение выбранных огнеупорных изделий, которые обеспечат формирование

внутреннего и наружного габаритных размеров огнеупорного слоя печи по длине, ширине и высоте и выполнить эскиз размещения огнеупорной футеровки.

Таблица 1.3 – Толщина слоя футеровки печи

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

По длине стенок печного пространства на боковых стенках печи необходимо разместить нагреватели (проволочные в виде спирали или ленточные в виде зигзагов рассчитанных размеров), размеры которых рассчитаны выше, так, чтобы вся длина нагревателей укладывалась с запасом 50–75 мм относительно задней и передней стенки, а также пода и свода печи. Если нагреватели не размещаются по площади боковой поверхности печи сопротивления с равномерным шагом, необходимо размещать их в поду и своде печи и предложить способ их крепления.

После выбора огнеупорного материала необходимо подобрать теплоизоляционный материал и толщину этого слоя. Главная функция теплоизоляционного материала – снижение потерь тепла через стенки печи и доведение температуры наружных стенок печи до значения, не превышающего 60 °С. В связи с этим главное требование к материалам, применяемым для теплоизоляции, – низкая теплопроводность при хорошей огнеупорности. Теплоизоляционные материалы бывают рыхлыми и легкими по весу, либо пористыми. Используют кирпичи, плиты или блоки из диатомита, перлита, зонолита, минеральной и шлаковой ваты.

Одним из наиболее распространенных теплоизоляционных материалов, используемых в электропечестроении, являются диатомит, который выпускают в виде кирпичей, плит, фасонных изделий и засыпки.

Толщину теплоизоляционного слоя выбирают по таблице 1.3.

Размеры кирпичей из теплоизоляционных материалов приведены в ГОСТе [8].

Полученные выше размеры огнеупорного слоя используют затем для определения внешних габаритов печи с учётом выбранной толщины теплоизоляционного слоя.

Затем составляют эскиз печного пространства. Имея расчетный эскиз печи, может быть составлен её тепловой баланс, по которому вычисляют мощность печи с учётом выбранных огнеупорных и теплоизоляционных материалов (в курсовой работе не выполняется).

1.4 Порядок выполнения работы

Изучить общие положения, порядок расчёта и расчётные формулы, приведенные в подразделе 1.2.

По заданному варианту индивидуального задания для материала заготовки определить вид термической обработки, используя доступные источники информации по материаловедению и технологии термической обработки сталей, найти рекомендованные режимы, кратко описать порядок выполнения процесса. Некоторые данные по режимам различных видов термической обработки сталей приведены в источнике [9].

Учитывая размеры заготовок и объём загрузки печи, рекомендованный выше, определить габаритные размеры внутреннего печного пространства электрической печи сопротивления и рассчитать полезный объём рабочего пространства.

Выбрать материал нагревателя. Используя эмпирические правила, определить удельную мощность нагревателей и рассчитать потребляемую печью мощность. По полученному значению выбрать способ подключения нагревателей к питающей сети, рассчитать силу тока и сопротивление нагревателя, изобразить схему его подключения.

В зависимости от способа подключения нагревателей к питающей сети и заданного вида нагревателя, рассчитать геометрические размеры нагревателя:

– для проволочного нагревателя – диаметр проволоки с учётом выпускаемого сортамента и её длину, диаметр и шаг проволочной спирали, способ размещения нагревателя в рабочем пространстве печи, выполнить эскиз части спирали нагревателя;

– для ленточного нагревателя – толщину, ширину и длину, учитывая сортамент выпускаемой ленты, шаг зигзага, способ установки ленточного нагревателя в печи, выполнить эскиз части ленточного нагревателя.

Провести проверку правильности расчёта геометрических параметров нагревателей, определив поверхностную мощность рассчитанного нагревателя, которая не должна превысить допустимую поверхностную мощность. При несоблюдении приведенного условия увеличить диаметр проволоки или размеры ленточного нагревателя и провести повторную проверку по поверхностной мощности.

Выбрать материал для изготовления огнеупорной футеровки, зная внутренние размеры печного пространства, затем рассчитать размеры наружного слоя из огнеупорного материала.

Выбрать теплоизоляционный материал и задать его толщину. Определить внешние габаритные размеры печи (без кожуха).

Используя расчётные значения по размерам нагревателей, разместить их на внутренних боковых стенках печного пространства, выдерживая расстояние между нагревателями, стенками, подом и сводом печи (см. стр. 7).

Изобразить эскиз печи, на котором показаны нагреватели и способ их расположения в печи, слои футеровки в виде кирпичей или плит из выбранных огнеупорного и теплоизоляционного материалов.

1.5 Требования к оформлению курсовой работы

Выполненные этапы курсовой работы следует оформить в виде пояснительной записки.

Для оформления записки используют редактор Microsoft Word. Документ должен включать титульный лист, содержание, введение, основной раздел (и подразделы – при необходимости), список использованных источников, приложения (при наличии).

Оформление каждого структурного элемента, основной текстовой части (разделов и подразделов), таблиц, рисунков, формул, ссылок, приложений в расчётно-графической работе должно соответствовать ГОСТ 7.32–2017 [11]. Библиографическое описание использованных источников указывают в списке использованных источников в соответствии с СТБ 7.1 [7], а в тексте – в виде номера в квадратных скобках по порядку их упоминания.

Электронный документ распечатывают на одной стороне бумаги формата А4 через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть чёрным, высота букв, цифр и прочих знаков для шрифта Times New Roman – 14 пунктов. Размеры полей страницы: левое – 30 мм, верхнее и нижнее – 20 мм, правое – 15 мм. Все страницы в расчётно-графической работе брошюруются в один документ и нумеруются сквозной нумерацией. Титульный лист не нумеруется (назначается особый колонтитул для первой страницы), но входит в общую нумерацию страниц.

Материал в записке по курсовой работе должен быть изложен технически грамотно и чётко, использование не стандартизованных терминов не допускается. Расчёты при необходимости иллюстрируются эскизами, схемами, графиками. В списке использованных источников отражаются только источники информации, которые использованы при выполнении курсовой работы.

Пример оформления титульного листа курсовой работы приведен в Приложении А.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Макаров, А. Н. Электротехнологические установки : учебное пособие / А. Н. Макаров, А. Ю. Соколов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 288 с.

2 Гардин, А. И. Электротехнологические промышленные установки. Практикум : учебное пособие / А. И. Гардин, О. Ю. Малафеев, С. Н. Юртаев. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 292 с.

3 Нагреватели. Методика и примеры расчёта / «Метотехника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rom.by/files/art_nagrev_1.pdf?_ysclid=1w94o8gfgm837599569 – Дата доступа: 24.04.2024.

4 ГОСТ 10994–74. Сплавы прецизионные. Марки : дата введения 1975-01.01 / разработан Министерством чёрной металлургии СССР. – Москва : государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 2004 (переиздание с Изменениями и Поправкой), 2002 г. – 17 с.

5 ГОСТ 12766.1–90. Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия (с Изменением № 1) : дата введения 1991-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004 (переиздание). – 16 с.

6 ГОСТ 5040–2015. ИЗДЕЛИЯ ОГНЕУПОРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ. Технические условия : дата введения 2016-04–01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 15 с.

7 ГОСТ 8691–2018. ИЗДЕЛИЯ ОГНЕУПОРНЫЕ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ. Форма и размеры : взамен ГОСТ 8691–1973 : дата введения : 2019-02-01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 50 с.

8 ГОСТ 2694–78. Изделия пенидиатомитовые и диатомитовые теплоизоляционные. Технические условия : взамен ГОСТ 2694–67 : дата введения 1979-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1978. – 6 с.

9 Режимы термообработки стали : РОСТ-ТЕРМО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rost-termo.ru/spravka-po-termoobrabotke/rezhimy-termoobrabotki-stali/> – Дата доступа: 08.10.2024.

10 ГОСТ 7.32–2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ. Структура и правила оформления : взамен: ГОСТ 7.32-2001 : дата введения 2019-07-01. – Минск : Госстандарт, 2019. – 27 с.

11 СТБ 7.1–2024. СИБІД. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления = Бібліяграфічны запіс. Бібліяграфічнае апісанне. Агульныя патрабаванні і правілы складання : впервые : дата введения 2024-01-01. – Минск : Госстандарт, 2024. – 60 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример оформления титульного листа курсовой работы

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

Кафедра «Технология машиностроения»

Курсовая работа по дисциплине

«Электротехнологические установки»

Выполнил:

студент группы Тэт-____

Ф.И.О

Проверил:

доцент

Ф.И.О.

Витебск, 20 ____

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Методические указания
по выполнению курсовой работы

Составитель:
Савицкий Василий Васильевич

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В.В. Савицкий*

Подписано к печати 19.11.2024. Усл. печ. листов 1,4.
Уч.-изд. листов 1,9. Заказ № 245.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.