

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования

Курганский государственный университет

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Электротехнологические промышленные установки»
для студентов направления подготовки 13.03.02.
«Электроэнергетика и электротехника»

Курган 2019

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Электротехнологические промышленные установки»
(направление подготовки 13.03.02.).

Составил: канд. техн. наук, доцент В. А. Савельев.

Утверждены на заседании кафедры

«20» декабря 2018 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2017 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить назначение, конструкцию, оборудование и работу электротермической тигельной печи сопротивления.

Общие сведения

Электротермические устройства и оборудование широко используются в процессах преобразования электрической энергии в тепловую. Большую группу составляют электронагревательные устройства и приборы, используемые в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту. К таким устройствам относятся электротермические печи, весьма разнообразные по назначению, конструкции и размерам.

Многообразие электрических печей вызывает необходимость в их классификации. По технологическому назначению электропечи делят на плавильные и термические. По способу превращения электрической энергии в тепловую их классифицируют:

1 Печи с нагревом сопротивлением – электрическая энергия превращается в тепловую при протекании тока через твердые или жидкие тела.

2 Печи с нагревом электрической дугой – электрическая энергия превращается в тепловую в дуговом разряде в газообразной среде или парах металла.

3 Печи с нагревом дугой и сопротивлением – электрическая энергия превращается в тепловую в дуговом разряде и при протекании тока в твердых и жидких телах.

4 Печи с нагревом преимущественно в переменном магнитном поле – электрическая энергия превращается в энергию переменного магнитного поля, а затем в тепловую в помещенных в это поле телах.

5 Печи с нагревом преимущественно в переменном электрическом поле – электрическая энергия превращается в энергию переменного электрического поля, а затем в тепловую в находящихся в этом поле телах;

6 Печи с нагревом электронным пучком – энергия электронного пучка превращается в тепловую в телах, бомбардируемых электронными пучками.

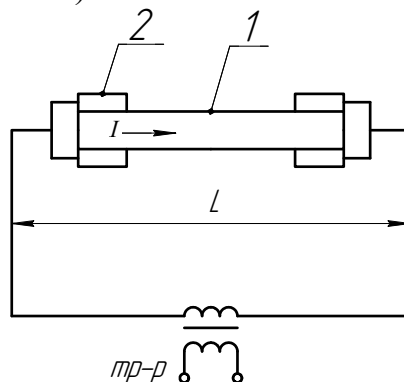
В лабораторной работе рассматривается устройство и работа электротермической печи сопротивления. В таких электропечах и электротермических устройствах используется выделение тепла электрическим током при прохождении его через твердые и жидкие тела. Электропечи этого вида преимущественно выполняются как печи прямого и косвенного нагрева.

Превращение электроэнергии в тепло в печах косвенного нагрева происходит в твердых нагревательных элементах, от которых тепло путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу, либо в жидком теплоносителе – расплавленной соли, в которую погружается нагреваемое тело, и тепло передается ему путем конвекции и теплопроводности. На рисунке 1 изображена печь косвенного нагрева.



Рисунок 1 – Внешний вид печи косвенного нагрева

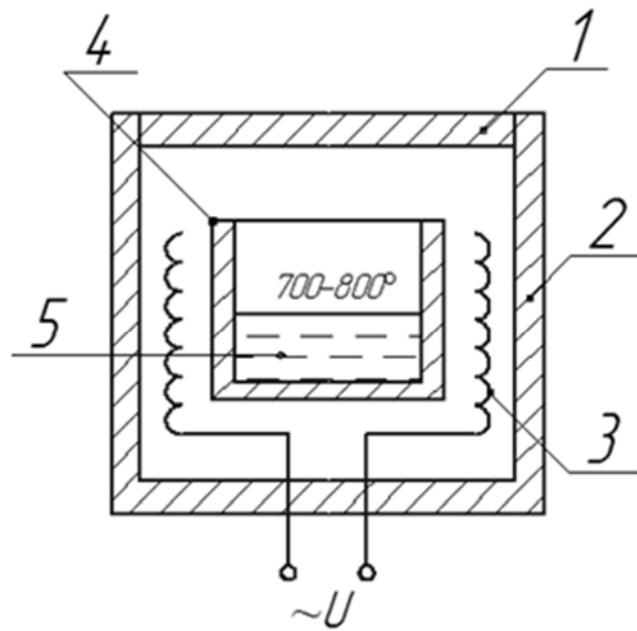
В печах прямого действия нагреваемое тело включено непосредственно в электрическую цепь (рисунок 2).



1 – нагреваемая деталь, 2 – зажим

Рисунок 2 – Схема работы печи прямого нагрева

Печи сопротивления – самый распространенный и многообразный вид электропечей. Плавильные печи сопротивления применяют преимущественно при производстве литья из легкоплавких металлов и сплавов. В установках этого типа производится выплавка олова, свинца, цинка и различных сплавов на их основе, а также других металлов, имеющих температуру плавления $600 - 800^{\circ}\text{C}$. Важное значение имеют ЭПС для плавки алюминия и его сплавов, поскольку позволяют достичь высокой степени очистки. На производстве и в лабораториях получили распространение тигельные печи для получения деталей методом литья. Тигельные печи (рисунок 3) представляют собой металлический сосуд – тигель (из металла с внутренней обмазкой оксидами), помещаемый в цилиндрический корпус, выполненный из огнеупорного материала (шамотный или диносовый кирпич с прослойкой листовым асбестом), покрытый снаружи металлическим кожухом 2. Между тиглем и футеровкой размещены электрические нагреватели 3.



1 – свод печи, 2 – кожух печи с обмуровкой, 3 –нагреватель,
 4 – тигель, 5 – расплавленный металл
 Рисунок 3 – Схема тигельной печи сопротивления

В лабораторной работе используется шахтная лабораторная электропечь сопротивления СШОЛ-1.1,6/12-МЗ, предназначенная для плавки и термообработки различных материалов при температуре до 1250 °С в стационарных лабораториях и производствах.



Рисунок 4 – Внешний вид печи СШОЛ – 1.1,6/12

Электродпечь (рисунки 3, 4) представляет собой прямоугольный корпус, выполненный из тонколистовой стали, в котором размещена камера нагрева. Камера нагрева футерована изнутри огнеупорным материалом состоит из свода печи 1с керамическим фланцем, нагревателя 3, пода печи, тигля 4 и теплоизоляции. Тигель устанавливается в печь через керамический фланец, а внутри тигля находится расплавленный металл 5. Нагреватель выполнен в виде металлической спирали из проволоки хромоникелевого сплава X20H80, которая закреплена в пазах теплоизоляции. Внутренняя поверхность теплоизолятора образует рабочее пространство электродпечи. Для уменьшения тепловых потерь через отверстие в своде рабочей камеры оно закрывается крышкой.

Работа печи сопротивления

Принципиальная схема работы печи сопротивления представлена на рисунке 5. В состав печи входят: потенциометр П с регулятором температуры и датчиком - термопарой, установленной в стенке печи и выведенной в рабочее пространство внутри неё, блок включения, управления и сигнализации, силовой блок питания печи электроэнергией.

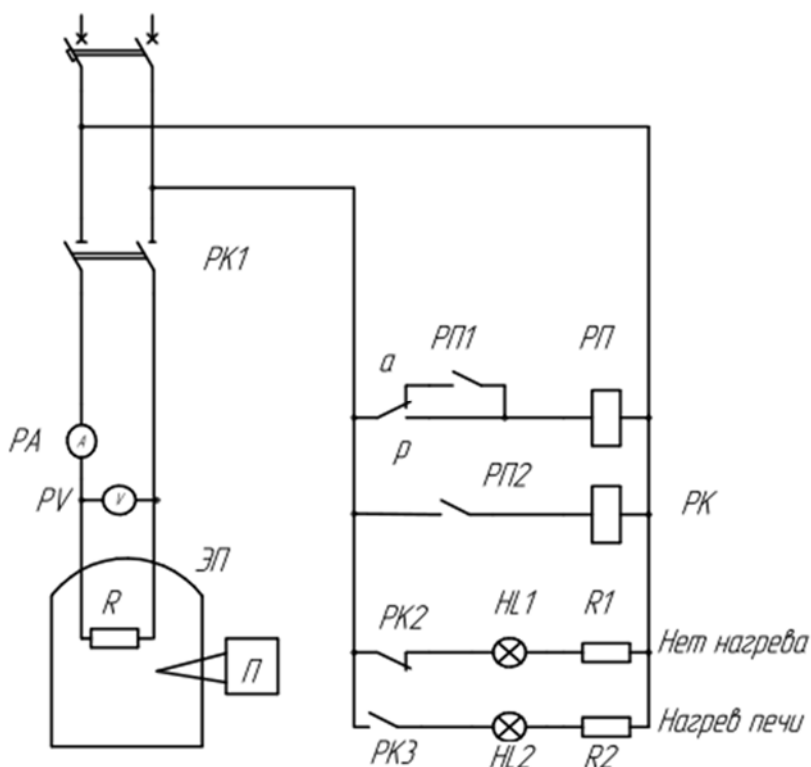


Рисунок 5 – Принципиальная схема работы печи сопротивления

Управление электродпечью выполняется блоком управления, включения и сигнализации. Контроль за температурой печи ведётся потенциометром через термопару, которая установлена в корпусе печи. Потенциометром устанавливается заданная температура нагрева, а схема управления осуществляет включение и выключение нагревателя. Работа печи может проходить в ручном и автоматическом режиме. Перевод режима работы происходит при переключении

тумблера *a/p*. В автоматическом режиме *a* работой управляет регулятор температуры потенциометра, который срабатывает от сигнала термопары и замыкает (или размыкает) контакт РП1. Затем реле РП замыкает контакт РП2, который в свою очередь включает реле РК и замыкает цепь питания нагревателя R печи. Одновременно переключаются контакты РК2 и РК3, включая сигнальную лампу HL2 «нагрев печи» и выключая лампу HL1 «нет нагрева». В режиме *p* включение реле РП производится вручную.

Регулирование температурного режима нагревателя.

Управление температурным режимом нагревателя осуществляется потенциометром задачи и контроля температуры (рисунок 6). Указателем на поле шкалы прибора устанавливается требуемая температура, а стрелка шкалы показывает реальную температуру нагрева. Потенциометр связан с датчиком температуры внутри печи (хромель-алюмелевая термопара). Контроль за температурой нагрева печи происходит в автоматическом режиме реле потенциометра.

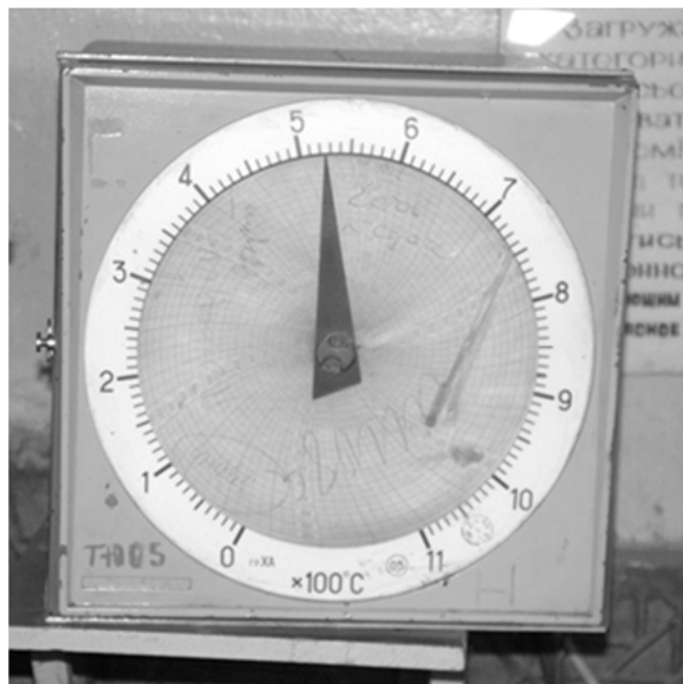


Рисунок 6 – Потенциометр установки и контроля температуры.

В печах сопротивления в подавляющем большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры – двухпозиционное регулирование, при котором исполнительный элемент системы регулирования (контактор) имеет лишь два крайних положения: «включено» и «выключено». Во включенном состоянии температура печи растет, так как её мощность всегда выбирается с запасом, и соответствующая ей установившаяся температура значительно превосходит её рабочую температуру. В выключенном состоянии температура печи снижается по экспоненциальной кривой. Для идеализирован-

ного случая, когда в системе регулятор – печь отсутствует динамическое запаздывание, работа двухпозиционного регулятора показана на рисунке 7.

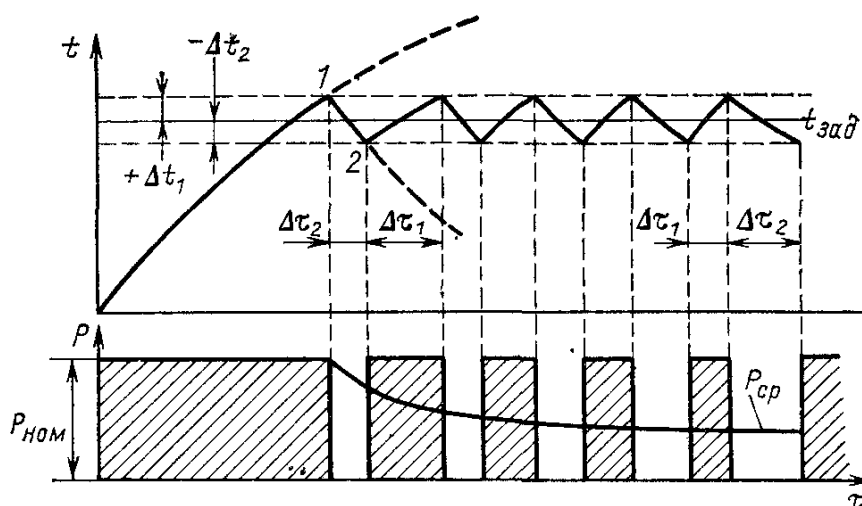


Рисунок 7 – Идеализированная схема работы двухпозиционного регулятора температуры

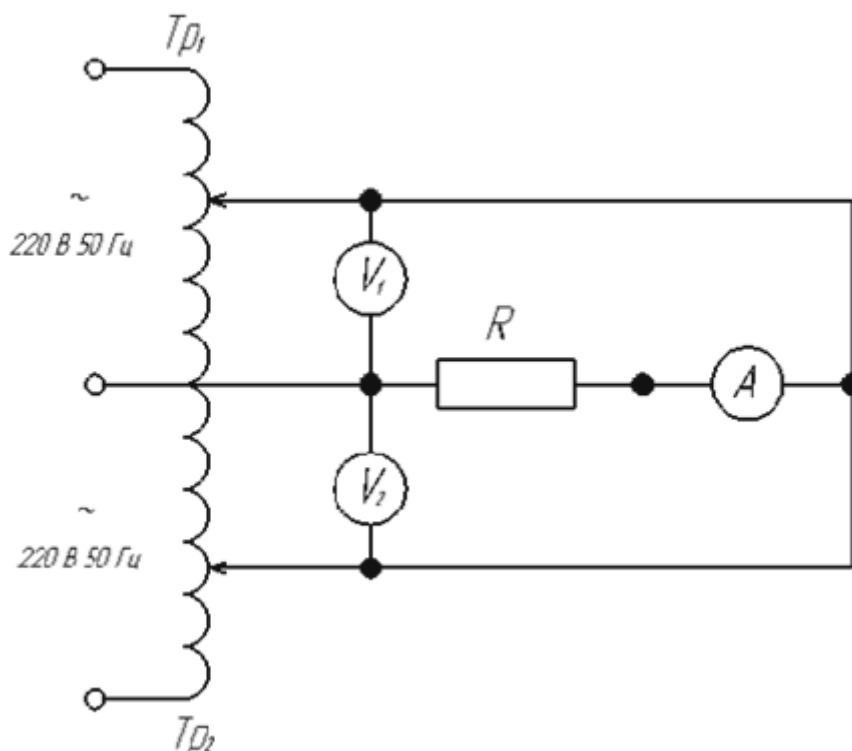
В верхней части рисунка показана зависимость температуры печи от времени, в нижней – соответствующее изменение её мощности. При разогреве печи её мощность будет постоянна и равна номинальной. Температура растёт до точки 1 и достигает значения $t_{зад.} + \Delta t_1$. В этот момент регулятор сработает, контактор отключит печь и её мощность упадёт до нуля. Температура печи начнет падать по кривой 1 – 2 до значения $t_{зад.} - \Delta t_2$. Далее произойдёт включение нагрева печи и её температура снова начнёт возрастать. Процесс регулирования температуры по двухпозиционному принципу заключается в её изменении по пилообразной кривой около заданного значения в пределах интервалов $+\Delta t_1$, $-\Delta t_2$, которые являются зоной нечувствительности регулятора. Средняя мощность печи зависит от соотношения интервалов времени её включённого состояния $\Delta \tau_1$ и выключенного состояния $\Delta \tau_2$. По мере прогрева и загрузки печи кривая нагрева будет идти круче, а кривая остывания – положе, поэтому отношение периодов цикла $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$ будет уменьшаться, следовательно, будет падать и средняя мощность $P_{ср}$. При двухпозиционном регулировании средняя мощность печи всё время приводится в соответствие с мощностью, необходимой для поддержания постоянной температуры.

Основным источником динамического запаздывания в системе регулятор – печь является инерция датчика–термопары, особенно если термопара снабжена защитой керамическим и металлическим чехлами. Чем больше это запаздывание, тем больше колебания температуры нагревателя превышают зону нечувствительности регулятора.

Схема питания нагревателя печи сопротивления

Схема питания нагревателя тигельной печи сопротивления представлена на рисунке 8. Нагреватель R питается от сети 220В через два автотрансформатора, включённых параллельно. Параллельное включение трансформаторов ис-

пользуют, когда для питания приёмника мощности одного трансформатора не хватает и для питания потребителя требуется большая надёжность.



R – нагреватель печи; $Tr1$ и $Tr2$ – автотрансформаторы;
 V_1, V_2 – вольтметры; A – амперметр

Рисунок 8 – Схема питания нагревателя тигельной печи сопротивления

При параллельной работе к первичным обмоткам подводится одно и тоже напряжение U . Вторичные обмотки подключаются к нагрузке через общую шину.

Основы кинетики нагрева

Уравнение теплового баланса нагреваемого тела имеет вид:

$$Q_{нагр.} = Q_{пол.} + Q_{пот.},$$

где $Q_{нагр.}$ – тепло, полученное в результате преобразования электрической энергии в тепловую, Дж (тепло нагревателя);

$Q_{пол.}$ – тепло, затраченное на нагрев материала, Дж (полезное тепло);

$Q_{пот.}$ – потери тепла в окружающую среду, Дж (потери).

Тепло, полученное в результате преобразования электрической энергии в тепловую, определяется электрическими параметрами тока и напряжения нагревателя:

$$Q_{нагр.} = U I \tau,$$

где $Q_{нагр.}$ – теплота нагревателя, Дж;

U – напряжение сети, В;

I – ток цепи А;

τ – время нагрева с.

Потребное количество теплоты для нагрева и расплавления металла в тигле печи сопротивления можно определить, используя следующую зависимость:

$$Q_{\text{пол.}} = m \cdot c \cdot \Delta t$$

где $Q_{\text{пол.}}$ – количество теплоты [Дж],

m – масса нагреваемого изделия (тигель с металлом) [кг],

c – удельная массовая теплоемкость изделия Дж/кг °С,

Δt – перепад температур равный $(t_2 - t_1)$ °С,

где t_1 – начальная температура, t_2 – конечная температура нагрева.



Рисунок 9 – Тигель для нагрева металла

Потери теплоты в окружающую среду

При нагреве значительное количество теплоты выделяется в окружающую среду через стенки печи. Стенка шахтной печи облицована стальным листом, изнутри футерована огнеупорным материалом (шамотный кирпич), а между ними имеется теплоизоляционная прослойка – листовой асбест. Распределение материалов в стенке печи показано на рисунке 9. Толщина огнеупора – шамотного кирпича составляет 125 мм (δ_1), слоя листового асбеста – 10 мм (δ_2), и наружного слоя листового металла – 3 мм. (δ_3).

Расход теплоты через стенку печи можно определить по закону теплопроводности Фурье:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c4}}{R} = \frac{\Delta t}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

где q – плотность теплового потока через стенку печи Вт/м²С;

Δt – перепад температур противоположных стенок печи °С;

R – термическое сопротивление.

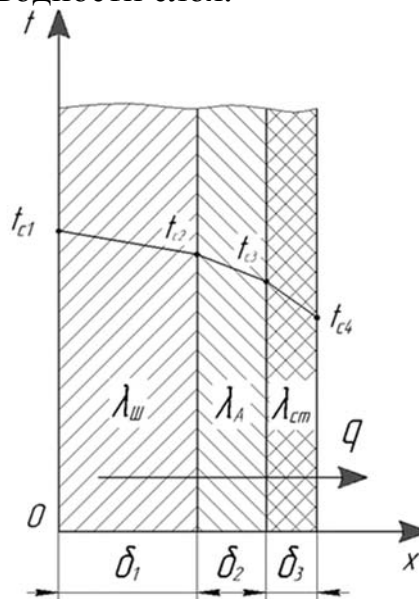
Термическое сопротивление стенки определим по формуле:

$$R = \sum_1^n R_i = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

где R_i – термическое сопротивление каждого слоя стенки;

δ_i – толщина i слоя стенки;

λ_i – коэффициент теплопроводности слоя.



δ_1 – толщина шамотного слоя кирпича; δ_2 – толщина листового асбеста; δ_3 – толщина облицовочного слоя; t_{c1} – температура внутренней стенки печи; t_{c4} – температура наружной стенки; $\lambda_{ш}$ – коэффициент теплопроводности огнеупорного материала; λ_A – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя асбеста; $\lambda_{ст.}$ – коэффициент теплопроводности облицовочного слоя металла

Рисунок 10 – Схема состава стенки печи

Теплоту, теряемую через стенки печи – $Q_{ном.}$, можно определить по формуле:

$$Q_{ном.} = q S \cdot \tau ,$$

где S – площадь поверхности печи, $м^2$,

q – плотность теплового потока через стенку печи $Вт/м^2$,

τ – время нагрева, $с$.

Измерение температуры печи

Температура внутри печи определяется по показаниям термопары потенциометра марки КСП-3, установленной в нагревательной камере.

Температуру наружной стенки печи можно определить термометром контактным марки ТК 5.03. (рисунок 11). Термометры ТК 5.03 состоят из электронного блока и сменного зонда, предназначенного для измерения температуры жидких, сыпучих, газообразных сред и поверхностей твердых тел. В качестве термочувствительных элементов в зондах используются термопреобразователи термоэлектрические ХА(К) по ГОСТ Р50431.

Электронный блок предназначен для преобразования сигнала, поступающего с выхода зонда, в сигнал измерительной информации, который высвечивается на жидкокристаллическом дисплее. Диапазон измеряемой температуры прибора от – 40 до 200 °С, показатель тепловой инерции 6 сек.



Рисунок 11 – Термометр контактный цифровой ТК5.03

Определение времени нагрева печи

Теплоту, теряемую через стенки печи - $Q_{пот.}$, определяем по формуле:

$$Q_{пот.} = q S \cdot \tau ,$$

где S – площадь поверхности печи, $м^2$,

q – плотность теплового потока через стенку печи $Вт/м^2$,

τ – время нагрева, $с$.

Преобразуем формулу теплового баланса в следующий вид:

$$Q_{нагр.} - Q_{пот.} = Q_{пол.}$$

зная количество теплоты, необходимое для нагрева изделия, можно ориентировочно вычислить время нагрева по формуле:

$$\tau = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{U \cdot I - q \cdot S} ,$$

τ - время нагрева $с$

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в литейной лаборатории с использованием шахтной тигельной печи сопротивления СШОЛ-1.1,6/12.

Перед началом работы необходимо ознакомиться с правилами работы в лаборатории технологии литья, осмотреть печь, наличие кокиля в печи и расплавленного металла в нём, убедиться в исправности печи.

Перед загрузкой кокиля в печь, его необходимо взвесить. Необходимо также измерить размеры наружных стенок печи. Затем установить на потенциометре требуемую температуру нагрева ($650 - 700$ °С) и включить печь под руководством учебного мастера. Замерить ток и напряжение в цепи нагревателя. Напряжение на вольтметрах должно быть одинаковым. Результаты измерений занести в таблицу наблюдений.

По достижении заданной температуры печи на табло потенциометра и визуальном осмотре кокиля с расплавленным металлом в нём, замеряют температуру наружных стенок печи. Замеры производят не менее 5 раз в разных точках стенок печи. Среднее значение измерений заносят в таблицу наблюдений. Замер температуры наружных стенок печи производят термометром цифровым

контактным ТК 5.03 касанием зондом в точке измерения температуры. Включить термометр можно однократным нажатием на клавишу «ВКЛ». При этом на экране высвечивается «On», затем значение измеренной температуры при последнем включении прибора, которое затем сменяется текущим значением измеряемой температуры (измерение проводится приблизительно один раз в 0,2 с). При неисправности зонда высвечивается «Err». При разряде батареи питания ниже допустимого уровня высвечивается «РАЗР».

Обработка результатов опытов.

Определяем тепловую мощность нагревателя по формуле:

$$P_{нагр.} = UI,$$

где U – напряжение сети, B ; I – ток цепи A .

Потребное количество теплоты для нагрева и расплавления металла в тигле печи сопротивления определяем, используя следующую зависимость:

$$Q_{пол.} = m \cdot c \cdot \Delta t,$$

где $Q_{пол.}$ – количество теплоты [Дж.],

m – масса нагреваемого изделия (тигель с металлом) [кг],

c – удельная массовая теплоемкость изделия Дж/кг^{°C},

Δt – перепад температур равный $(t_2 - t_1)$ °C,

где t_1 – начальная температура, t_2 – конечная температура нагрева.

Потерю теплоты через стенку печи определяем по закону теплопроводности Фурье.

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c4}}{R} = \frac{\Delta t}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где q – плотность теплового потока через стенку печи Вт/м²;

Δt – перепад температур противоположных стенок печи °C,

R – термическое сопротивление.

Термическое сопротивление стенки определим по формуле:

$$R = \sum_1^n R_i = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

где R_i – термическое сопротивление каждого слоя стенки;

δ_i – толщина i слоя стенки;

λ_i – коэффициент теплопроводности слоя.

Термическое сопротивление стенки $R = \sum_1^n R_i = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$:

$$R = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_2}{\lambda_A} + \frac{\delta_3}{\lambda_{ст}},$$

где δ_1 – толщина слоя шамотного кирпича; δ_2 – толщина листового асбеста; δ_3 – толщина облицовочного слоя;

$\lambda_{ш}$ – коэффициент теплопроводности огнеупорного материала, λ_A – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя асбеста, $\lambda_{ст.}$ – коэффициент теплопроводности облицовочного слоя металла.

Плотность теплового потока через стенку печи определим по формуле:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c4}}{R},$$

где q – плотность теплового потока $Вт/м^2$;

t_{c1} – температура внутренней стенки печи;

t_{c4} – температура наружной стенки;

R – термическое сопротивление стенки печи.

Ориентировочное время нагрева печи определяем по формуле:

$$\tau = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{U \cdot I - q \cdot S},$$

где τ – время нагрева $с$,

S – площадь поверхности стенок печи, $м^2$.

Результаты расчетов заносим в таблицу.

Форма отчета по лабораторной работе

Название и цель работы.

Электрическая схема подключения печи сопротивления к сети.

Таблица измеренных и рассчитанных показателей.

Выводы.

Таблица 1 Результаты измерений и расчётов нагрева электрической печи сопротивления СШОЛ

Измеренные величины	
Масса кокиля и расплавляемого металла, кг	7
Площадь поверхности стенок печи, $м^2$	350
Напряжение в цепи нагревателя, В	220
Ток в цепи нагревателя, А	8
Температура внутри печи, $^{\circ}C$	720
Средняя температура наружных стенок печи, $^{\circ}C$	80
Толщина слоя шамотного кирпича, мм.	125
Толщина слоя асбеста, мм.	10
Толщина слоя облицовочного металла, мм.	3
Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича, $Вт/м^{\circ}C$	0,6
Коэффициент теплопроводности асбеста листового, $Вт/м^{\circ}C$	0,4
Коэффициент теплопроводности облицовочного металла, $Вт/м^{\circ}C$	58
Удельная массовая теплоёмкость изделия, $Дж/кг^{\circ}C$	480
Рассчитанные показатели	
Термическое сопротивление стенки печи, $м^2^{\circ}C/Вт$	
Перепад температур через стенку печи, $^{\circ}C$	
Плотность теплового потока через стенку печи, $Вт/м^2$	
Тепловая мощность нагревателя печи, $Вт$	
Количество теплоты, необходимое для нагрева изделия, $Дж$	
Ориентировочное время нагрева печи до расплавления металла, ч	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назовите классификацию электротермических нагревательных устройств, используемых в хозяйственной деятельности.
- 2 Перечислите разновидности электротермических печей сопротивления.
- 3 Как устроена электротермическая печь сопротивления косвенного нагрева.
- 4 Поясните устройство тигельной печи сопротивления.
- 5 Какие печи сопротивления относятся к печам прямого нагрева.
- 6 Как обеспечивается контроль температуры нагрева в печах сопротивления.
- 7 Опишите принципиальную схему работы печи сопротивления.
- 8 Какие способы обмена тепловой энергией между физическими телами вы знаете?
- 9 В каких случаях используют параллельное подключение печей сопротивления.
- 10 В каких случаях для передачи теплоты используют закон Фурье?
- 11 Как рассчитывается потребное количество тепловой энергии для нагрева изделия?
- 12 Какие приборы для измерения температуры электротермических устройств вы знаете?
- 13 Что такое конвективный теплообмен и как он определяется?
- 14 Как поддерживается постоянство температуры нагрева?
- 15 Используя какой закон электротехники можно определить параметры нагревателя?
- 16 Поясните определение температуры с использованием термопары?
- 17 Как осуществляется регулирование температуры в печи?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Электротехнические установки и их источники питания : учебное пособие для вузов по спец. «Промышленная электроника» / сост. В. И. Бар. – Тольятти : ТГУ, 2002.
- 2 Электротехнологические промышленные установки : учебник для вузов / И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский / Под редакцией А. Д. Свенчанского. – Москва : Энергоиздат, 1982.
- 3 Манин А. В. Электротехнологические процессы и установки : учебное пособие. – Рыбинск РГАТА имени П. А. Соловьёва, 2010. Ч.1 – 188 с.
- 4 Г. Ф. Быстрицкий. Основы энергетики : учебник. – 3-е изд., стер. – Москва : КНОРУС, 2012. – 352 с.
- 5 Ф. Н. Сарапулов Расчёт параметров цепей электротехнологических установок : учебное пособие – Екатеринбург УГТУ, 1999.
- 6 Лысаков А. А. Электротехнология : курс лекций : учебное пособие – Ставрополь, 2013. – 124 с. – Режим доступа: – URL: <http://znanium.com/>

Виктор Андреевич Савельев

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ
ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Электротехнологические промышленные установки»
для студентов направления подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Н. Н. Погребняк

Подписано в печать 23.10.19	Формат 60×84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,0	Уч. изд. л. 1,0
Заказ 156	Тираж 15	Не для продажи

БИЦ Курганского государственного университета.

640020 г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.