

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Физическое металловедение и физика твердого тела»

621.78(07)
К709

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ НАГРЕВА И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕРМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Методические указания
к лабораторным работам

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2015

УДК 621.78(075.8)
К47

Одобрено
учебно-методической комиссией
физико-металлургического факультета

Рецензент:
проф., д.т.н. Рощин В.Е.

К709 Современные способы нагрева и оборудование в термическом производстве /сост. Ю.Д. Корягин, С.И. Ильин . – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 32 с.

В методических указаниях приведены основы расчета времени нагрева и охлаждения изделий из различных материалов.

Методические указания предназначены для бакалавров и магистров дневной и заочной формы обучения по направлениям «Металлургия» и «Материаловедения и технология материалов»

УДК 621.78(075.8)

Издательский центр ЮУрГУ, 2015.

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания, разделенные на две части, помогут студентам в процессе выполнения курсовых проектов и выпускных квалификационных работ, при расчете электрических печей сопротивления, применяемых для термической обработки металлов.

В первой части приводятся методики расчета времени нагрева и охлаждения изделий применительно к различным режимам термической обработки.

Во вторую часть методических указаний включены методики выполнения лабораторных работ по нагреву и охлаждению изделий, имеющих различные теплофизические характеристики.

В приложении приведены справочные материалы, необходимые при теплотехнических расчетах электрических печей.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 \hat{A} — расход, $\text{м}^3/\text{с}$;
 $C_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — константа излучения абсолютно чёрного тела;
 \tilde{n} — теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 D, d — диаметр, м (для проволоки мм);
 F — площадь поверхности, сечения, м^2 ;
 f — частота тока, Гц;
 G — масса, кг;
 $g=9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ — ускорение силы тяжести;
 h — шаг между витками, мм;
 H — высота, глубина, м;
 I — сила тока, А;
 L — длина, м;
 l — длина проволоки или ленты одного электрического нагревателя, м;
 m — коэффициент массивности;
 N — мощность тепловая, электрическая, Вт (при индукционном нагреве P);
 n — количество;
 P — давление, Па;
 Q — количество теплоты, Дж;
 q — плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 R — сопротивление электрическое, Ом;
 R — удельное тепловое сопротивление, $\text{К}/\text{Вт}$;
 r — полное тепловое сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;
 r — радиус, м;
 S — толщина слоёв кладки, м;
 T — температура по абсолютной шкале, К;
 t — температура по столбчатой шкале (Цельсия), $^{\circ}\text{C}$;
 U — напряжение, В;
 V — объём, м^3 ;
 w — скорость, $\text{м}/\text{с}$;
 W — удельная поверхностная нагрузка нагревателя, $\text{Вт}/\text{см}^2$;
 α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 β — температурный коэффициент физической величины, К^{-1} ;
 γ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 Δ — разность, напор;
 δ — активная глубина проникновения тока, мм;
 ε — степень черноты поверхности материала;
 η — коэффициент полезного действия;
 λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 μ — коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
 ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ — удельное электросопротивление, мкОм·м;
 Σ — сумма, суммарное;
 σ — напряжение, Па;
 τ — время, с;
 Φ — коэффициент диафрагмирования;
 φ — угловой коэффициент излучения;
 ω — степень развития кладки;
 $\hat{A}i = \alpha S / \lambda$ — число Био;
 $Fo = a \tau / S^2$ — число Фурье;
 $Nu = \alpha L / \lambda$ (или $\alpha d / \lambda$) — число Нуссельта;
 $Pe = wL / \alpha$ (или wd / α) — число Пекле;
 $Pr = \nu / a$ — число Прандтля;
 $Re = Pe / Pr = wL / \nu$ (или wd / ν) — число Рейнольдса;
 Gr — число Грасгофа;
 ϑ — относительный температурный напор.

1. РАСЧЁТЫ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Нагрев металла является одной из главных операций термической обработки, характеризуемой температурой, продолжительностью нагрева и скоростью охлаждения.

Продолжительность нагрева зависит от способа передачи тепла нагреваемому изделию. В соответствии с этим различают два метода нагрева: 1) прямой нагрев — нагрев металла внутренним теплом, генерируемым внутри изделия (электроконтактный, индукционный); 2) косвенный нагрев — нагрев металла внешними источниками тепла (в топливных и электрических печах, открытым факелом).

При выборе метода нагрева изделий необходимо учитывать технологические требования термической обработки и скорости, равномерности и точности нагрева до установленной температуры, а также экономическую целесообразность применения выбираемого способа нагрева.

В настоящее время в термических цехах чаще применяется косвенный нагрев в печах, при котором практически не ограничиваются размеры и форма изделий, в широком интервале (от 100 до 1400°C и выше) может задаваться конечная температура нагрева, обеспечивается высокая равномерность и точность нагрева до заданной температуры, а также возможна продолжительная выдержка изделий при заданной температуре.

1.1. Теоретические основы нагрева металла в печах

На поверхности нагреваемого в печи изделия протекает сложный тепловой процесс, включающий все формы теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение (лучеиспускание). Основными формами теплообмена, определяющими нагрев изделия в газовой среде печи, являются лучеиспускание и конвективный теплообмен. Для высокотемпературных и низкотемпературных печей, для различных атмосфер, заполняющих рабочее пространство печей, для разных сплавов соотношение интенсивностей этих форм теплообмена различное, что отражается на процессе нагрева изделий.

Интенсивность теплообмена между твердым телом и окружающей средой принято характеризовать коэффициентом теплоотдачи α , с которым непосредственно связан удельный тепловой поток на поверхности нагреваемого тела q . По закону Ньютона

$$q = \alpha \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \quad (1)$$

где $t_{\text{п}}$ — температура среды (печи), °C; $t_{\text{пов}}$ — температура поверхности нагреваемого тела (изделия), °C.

Учитывая сложность теплового процесса на поверхности нагреваемого изделия, коэффициент теплоотдачи считают сложной величиной, которая равна сумме коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_{\text{л}}$ и конвекцией $\alpha_{\text{к}}$:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}} . \quad (2)$$

Методы определения $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ выбираются в зависимости от условий теплообмена в печи. Величина α меняется в процессе нагрева изделий, однако в расчётах продолжительности нагрева изделий эти изменения не учитываются, и принимается среднее значение α .

В зависимости от условий теплообмена и способа работы печи (печи непрерывного или периодического действия) возможны три принципиально различных случая нагрева изделий. Во-первых, нагрев при постоянной температуре печи и переменном тепловом потоке на поверхности изделия. Этот случай нагрева характерен для печей периодического действия, в которых тепло к изделию передается в основном за счет теплового излучения, а также для электрических печей с искусственной циркуляцией воздуха (конвекционные печи), имеющих небольшие размеры рабочего пространства, и печей-ванн. Во-вторых, нагрев при переменной температуре печи, но постоянном тепловом потоке на поверхности изделия. Этот случай нагрева наблюдается в методических печах с преобладанием теплообмена лучеиспусканием, а также в печах периодического действия при резком падении температуры печи в момент загрузки в печь холодной массивной заготовки изделий. В-третьих, нагрев при переменной температуре печи и переменном тепловом потоке. Такой процесс нагрева характерен для конвекционных печей, имеющих большие размеры рабочего пространства.

Для расчёта продолжительности нагрева изделий в первом случае необходимо знать величину коэффициента теплоотдачи и температуру печи. во втором случае необходимо предварительно определить удельный тепловой поток на поверхности изделия. В третьем случае часто задаются коэффициентом теплоотдачи и законом изменения температуры печи.

После загрузки холодного изделия в печь происходит интенсивный нагрев его поверхностных слоев. Нагрев центральных слоев протекает с меньшей скоростью из-за термического сопротивления изделия. Изменяясь по величине, он может сохраняться в течение всего времени нагрева изделия. Это значительно усложняет определение времени нагрева изделия.

Величина перепада температуры по толщине изделия зависит от отношения термического сопротивления изделия к термическому сопротивлению передачи тепла к его поверхности. Чем больше указанное отношение, тем больше перепад температуры по толщине изделия. В теории теплообмена отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему термическому сопротивлению на его поверхности определяется числом Био.

$$Bi = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad (3)$$

где S/λ — внутреннее термическое сопротивление изделия; S — характерный геометрический размер изделия: для пластины — половина её толщины при двустороннем нагреве и полная толщина в случае одностороннего нагрева, для цилиндра и шара — их радиусы; λ — коэффициент теплопроводности металла; $1/\alpha$ — внешнее термическое сопротивление; α — коэффициент теплоотдачи.

Если величина Bi близка к нулю, то термическим сопротивлением изделия можно пренебречь, и его нагрев определяется только внешним теплообменом. В этом случае перепад температуры по сечению изделия можно не учитывать при определении времени его нагрева. Такие изделия называются «тонкими» в тепловом отношении в отличие от «массивных», температурный перепад в которых соизмерим с температурным напором на их поверхности.

За условную границу между тонкими и массивными изделиями принимают такое сечение, для которого число Био равно 0,25; при этом значении Bi максимальный перепад температуры по сечению изделия составляет 10 % от разности начальных температур изделия t_0 и внешней среды, то есть $\Delta t = 0,1(t_{\text{П}} - t_0)$. Таким образом, если $Bi < 0,25$, расчёты выполняются по формулам для тонких изделий, если же $Bi > 0,25$ — по методике, принятой для массивных изделий.

При расчётах продолжительности нагрева изделий необходимо также знать их теплофизические свойства, прежде всего плотность γ , удельную теплоёмкость c и коэффициент теплопроводности — λ . Для металлов и сплавов указанные параметры изменяются с изменением температуры. Однако при выполнении практических расчётов они принимаются постоянными величинами. Для уменьшения погрешности расчётов следует брать средние в рассматриваемом интервале температур значения теплофизических констант.

1.2. Особенности расчёта суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических печах

Рассмотрим определение средних значений коэффициентов теплоотдачи на поверхности изделий, нагреваемых в электрических печах.

В электрических печах без искусственной циркуляции воздуха основным видом теплообмена, определяющим нагрев изделий, является теплообмен лучеиспусканием. Конвективный теплообмен в результате свободного движения воздуха около поверхности нагреваемого изделия имеет небольшую интенсивность и коэффициент теплоотдачи конвекцией в нагревательной камере печей сопротивления с температурой выше 700 °С приближенно может быть принят равным 10...15 Вт/(м²·К). Для более низких температур он может быть подсчитан по одной из формул, изложенных ниже в разделе о конвективном теплообмене в топливных печах.

В частном случае при нагреве изделий из алюминиевых сплавов в низкотемпературных конвекционных печах величина коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием невелика из-за малой степени черноты изделий [1-3]:

Температура печи, °С	100	200	300	400	500	600
$\alpha_{\text{л}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	1,9	3,6	6,3	10,1	15,2	21,8

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в этом случае имеет большее значение и может быть вычислен по следующей формуле [1-3]:

$$\alpha_{\text{к}} = k \cdot w^{0,8}, \quad (4)$$

где k — коэффициент, зависящий от температуры печи:

Температура печи, °С	100	200	300	400	500	600
k	4,81	4,19	3,74	3,37	3,20	3,09

w — скорость воздушного потока в рабочей камере печи, м/с.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием в общем случае определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{п}} - T_{\text{м}}} \quad (5)$$

где $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{м}}$ — текущие значения температур соответственно печи и металла, К; $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{м}}} + \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{п}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{п}}} - 1 \right)}, \quad (6)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — константа излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{м}}$ — степень черноты нагреваемого металла; $\varepsilon_{\text{п}}$ — степень черноты кладки печи; $F_{\text{м}}$ — тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м^2 ; $F_{\text{п}}$ — поверхность нагревательной камеры печи, м^2 .

При нагреве в среднетемпературных электрических печах с воздушной атмосферой значение $C_{\text{пр}} \approx 2,5 \dots 3,0$.

При изменении температуры в рабочей камере печи среднее значение коэффициента теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_{\text{Л}} = \sqrt{\alpha_{\text{Л}}^{\text{Н}} \alpha_{\text{Л}}^{\text{К}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{ПР}}^{\text{Н}} C_{\text{ПР}}^{\text{К}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{ПН}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{МН}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{ПК}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{МК}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\text{ПН}} - T_{\text{МН}})(T_{\text{ПК}} - T_{\text{МК}})}}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{Л}}^{\text{Н}}$ и $\alpha_{\text{Л}}^{\text{К}}$ — коэффициенты теплоотдачи излучением соответственно в начале и в конце температурного интервала нагреваемого металла, Вт/(м²·К); $T_{\text{ПН}}$ и $T_{\text{МН}}$ — температуры соответственно печи и металла в начале нагрева, К; $T_{\text{ПК}}$ и $T_{\text{МК}}$ — температуры соответственно печи и металла в конце нагрева, К; $C_{\text{ПР}}^{\text{Н}}$ и $C_{\text{ПР}}^{\text{К}}$ — приведенные коэффициенты излучения соответственно в начале и конце нагрева, Вт/(м²·К⁴).

Если в процессе нагрева изделий температура в нагревательной камере остается неизменной, то

$$\alpha_{\text{Л}} = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{МН}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{МК}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\text{П}} - T_{\text{МН}}) \cdot (T_{\text{П}} - T_{\text{МК}})}}, \quad (8)$$

При определении $\alpha_{\text{Л}}$ в печи с постоянной температурой можно также пользоваться формулой

$$\alpha_{\text{Л}} = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\left(\frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{Мср}}}{100} \right)^4}{T_{\text{П}} - T_{\text{Мср}}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{Мср}}$ — средняя за время нагрева температура изделия, К :

$$T_{\text{Мср}} = 1/3 (t_{\text{МН}} + 2 t_{\text{МК}}) + 273, \quad (10)$$

где $t_{\text{МН}}$ и $t_{\text{МК}}$ — температуры изделия соответственно в начале и в конце температурного интервала нагрева, °С.

Средняя температура нагреваемого металла ($T_{\text{Мср}}$) может быть также определена по формуле

$$\left(\frac{T_{\text{Мср}}}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{МН}}}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{\text{МК}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (11)$$

В печах с постоянной температурой (700...900 °С) коэффициент теплоотдачи излучением приближенно можно подсчитать по эмпирической формуле:

$$\alpha_{\text{л}} \approx 0,03 C_{\text{ПР}} \left(\frac{T_{\text{Мср}}}{100} \right)^3. \quad (12)$$

Интенсивность конвективного теплообмена в рабочем пространстве печи зависит от скорости движения воздушной среды, а также от формы и размеров нагреваемых изделий, температуры кладки. Для среднетемпературных печей, не имеющих принудительной циркуляции печной атмосферы, коэффициент ($\alpha_{\text{к}}$) может быть принят равным 10...15 Вт/(м²·К).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ С ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Время нагрева тонких и массивных деталей (или деталей, расположенных в один ряд на полу) в камерной печи или соляной ванне с постоянной температурой может быть определено по формулам [1-4]:

$$\tau_1 = \frac{Gc}{\alpha F} 2,3 \cdot \lg \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{МН}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{МК}}}; \quad (13)$$

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha F \varphi} 2,3 \cdot \lg \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{МН}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{МК}}}, \quad (14)$$

где G — масса детали;

c — средняя удельная теплоемкость;

α — суммарный коэффициент теплоотдачи;

F — активная поверхность, то есть поверхность, воспринимающая тепло от внешней среды;

$t_{\text{п}}$ — температура печи;

$t_{\text{МН}}$ и $t_{\text{МК}}$ — начальная и конечная температуры нагреваемого изделия;

φ — коэффициент замедления нагрева.

Формула (13) используется при расчете времени нагрева тонких изделий, т.е. когда критерий Био меньше 0,25 [1-4, 5,6]:

$$\text{Bi} = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad (15)$$

где α — суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением;

S — половина толщины пластины или радиус цилиндра;

λ — средний коэффициент теплопроводности в интервале температур $t_{\text{МН}}$ и $t_{\text{МК}}$.

При $Bi > 0,25$ изделия следует считать массивным и при расчете времени его нагрева пользуются формулой (2), содержащей коэффициент замедления нагрева φ . Коэффициент φ , в свою очередь, определяется по следующим формулам:

1) для пластины, нагреваемой с двух сторон

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} Bi}; \quad (16)$$

2) для цилиндра

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5} Bi}; \quad (17)$$

3) для шара

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} Bi}. \quad (18)$$

Расчет времени нагрева массивных изделий в среде с постоянной температурой может быть также произведен и по вспомогательным графикам [1,5,6].

Формулы (1) и (2) применяются для определения времени нагрева в низко- и среднетемпературных печах. В случае преобладания в печи лучистого теплообмена, который имеет место при высоких температурах, время нагрева тонких изделий определяют по формуле

$$\tau = \frac{Gc}{c_{\text{и}} F} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^3} \left[\psi\left(\frac{T_{\text{МК}}}{T_{\text{п}}}\right) - \psi\left(\frac{T_{\text{МН}}}{T_{\text{п}}}\right) \right]. \quad (19)$$

Здесь G — масса металла;

c — средняя удельная теплоемкость металла в интервале $t_{\text{МН}}$ и $t_{\text{МК}}$;

$c_{\text{и}}$ — коэффициент излучения;

$T_{\text{п}}$ — температура печи;

ψ — температурная функция (табл. 1);

$T_{\text{МК}}$ и $T_{\text{МН}}$ — начальная и конечная температуры металла.

Исходные данные и результаты определения времени нагрева деталей представлены в работах [3, 6].

Зависимость $\psi(T/T_n)$ от T/T_n

T/T_n	$\psi(T/T_n)$	T/T_n	$\psi(T/T_n)$	T/T_n	$\psi(T/T_n)$
0,2	0,2	0,56	0,5718	0,91	1,1332
0,24	0,2402	0,60	0,6166	0,92	1,1659
0,28	0,2803	0,64	0,6639	0,94	1,2463
0,32	0,3207	0,68	0,7122	0,96	1,3563
0,36	0,3612	0,72	0,7655	0,98	1,537
0,40	0,4012	0,76	0,8229	0,99	1,713
0,44	0,4434	0,80	0,8864	0,994	1,842
0,48	0,4854	0,84	0,9599	0,998	2,117
0,52	0,5277	0,88	1,0389	0,999	2,293

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Работа 1. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И МАССИВНОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИХ НАГРЕВА В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В термическом производстве среди различных методов нагрева металла чаще всего применяются электрические печи сопротивления.

Электрические печи можно разделить на печи периодического и непрерывного действия, т.е. на садочные и методические.

Садочные печи имеют простую конструкцию, позволяют быстро переходить с одного технологического процесса термической обработки на другой.

При нагреве в печах периодического действия не ограничиваются размеры и форма изделий, в широком интервале может задаваться конечная температура нагрева.

Предлагаемая лабораторная работа позволяет оценить изменение характеристик нагрева при загрузке изделий различной формы и массивности, а также сопоставить расчетные данные по времени нагрева с экспериментальными результатами.

1.1. Цель работы

Определить время нагрева изделий различной формы и массивности в электрической печи периодического действия расчетным методом, в т.ч. с использованием ЭВМ, и сопоставить полученные данные с экспериментальными результатами.

1.2. Материал исследования

Заготовки различных размеров в форме цилиндра или параллелепипеда.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Выписать из справочников или приложения химический состав и теплофизические характеристики материала нагреваемых изделий. Определить размеры нагреваемых заготовок.

1.3.2. Ознакомиться с характеристикой и устройством печи, в которой будет осуществляться нагрев изделий (паспорт печи).

1.3.3. Установить и закрепить термопары на поверхности и в центре нагреваемого изделия. Одна термопара установлена около свода печи для регистрации температуры печного пространства.

1.3.4. Подключить термопары к модулю регистрации сигналов термопар «Triton6004TC» и включить его.

1.3.5. Запустить программное обеспечение «DataRecorder-T6004TC», которое является частью аппаратно-программного комплекса, предназначенного для измерений на базе контроллера «TRITON-6004TC». Эта программа обеспечивает проведение измерений, визуализацию и предварительную обработку данных, сохранение результатов в файле на диске, печать графиков. *Для запуска установленной программы выберите ее пиктограмму в разделе меню «Пуск | Программы | DataRecorder» или на рабочем столе. После того как программа запустится, на экране появится окно, озаглавленное «DataRecorder» - это Центральное окно, отсюда с помощью меню и командных кнопок панели инструментов выполняется управление работой программы.*

1.3.5.1. Проверка или настройка программы.

Открыть меню «Настройка», после чего проверить настройки всех подменю.

1.3.5.2. В подменю «Конфигурация» проверить активность каналов (от первого до четвертого) и выбранные градуировки термопар. Следует отметить, что первый канал используется для регистрации температуры печи, а остальные для измерения температуры изделия.

1.3.5.3. В подменю «Тип измеряемых данных» установить измерение температуры и градуировку термопары ТП.

1.3.5.4. В подменю «Опорный сигнал» установить значение температуры свободных концов термопары (20...25°C).

1.3.5.5. В подменю «COM-порт» проверить или установить «COM3».

1.3.5.6. В подменю «Настройка графика» проверить или установить стиль, размер и цвет точек каждого канала.

1.3.5.7. Включить начало измерения в меню «Измерение» кнопкой «Старт» или F9.

1.3.5.8. Осуществить загрузку изделия в печь, нагретую до заданной температуры. Момент загрузки изделия в печь является началом отсчета времени нагрева.

1.3.5.9. После нагрева изделия до заданной температуры остановить измерение кнопкой «СТОП» и выгрузить изделие из печи.

1.3.5.10. Сохранить результаты измерения. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Сохранить как» сохранить под определенным именем. Результаты измерения можно сохранить также в виде файла Excel. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в Excel» сохранить под определенным именем в виде Excel файла. Для вывода графика нагрева или охлаждения в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в графический файл» сохранить под определенным именем.

1.3.5.11. Для печати графика нагрева или охлаждения в меню «Печать» измерение через подменю «Печать графиков» и подменю «Настройка печати» распечатать на принтере.

1.3.6. Загрузить в печь изделие другой формы или массивности, предварительно установив термопары на его поверхности и в центре, и осуществить нагрев изделия до температуры; полученной при нагреве первого изделия повторив все пункты раздела 1.3.5.

1.3.8. Экспериментальные данные, распечатанные на принтере, обработать и занести в следующую таблицу.

Время, с	Температура, °C			Начальная температура изделия, °C	Заданная температура нагрева изделия, °C
	в печи	на поверхности изделия	в центре изделия		

1.3.9. Выполнить теоретический расчет времени нагрева изделий различной формы или массивности по соответствующим формулам и с использованием ЭВМ (методические указания раздела I.5 настоящей работы, I.2 приложения).

1.3.10. Сопоставить теоретические расчеты с экспериментальными результатами по нагреву изделий различной формы или массивности.

1.3.11. Сделать выводы о влиянии формы (массивности) загрузки на продолжительность нагрева в печах периодического действия.

1.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- а) цель работы;
- б) химический состав и теплофизические характеристики нагреваемых сталей;
- в) экспериментальные кривые нагрева изделий;
- г) расчеты времени нагрева изделий;
- д) выводы по работе.

1.5. Техника безопасности при выполнении работы

При работе с электрическими печами основное внимание должно быть уделено выполнению правил электробезопасности.

Все токоведущие части электрических печей должны быть изолированы или ограждены. Печи и металлические токонесущие части должны быть заземлены.

При нарушении нормальной работы электропечи необходимо отключить ее от сети и принять меры к устранению неисправности. Ремонтные работы вести только после снятия напряжения.

Температура поверхности передней стенки и дверцы печи выше 100 °С, поэтому следует соблюдать осторожность при работе с электропечью. Загрузку заготовок в печь и их выгрузку из печи производить специальными щипцами при выключенной печи.

Присоединение термопар к заготовкам и их отсоединение осуществлять на холодных заготовках (до загрузки в печь; после выгрузки из печи и охлаждения на воздухе).

1.6. Контрольные вопросы

1. Теплофизические свойства сталей и сплавов.
2. Определение «массивности» нагреваемых изделий.
3. Особенности нагрева теплотехнически «тонких» изделий в электрических печах периодического действия.
4. Особенности нагрева «массивных» изделий в электропечах периодического действия.

Работа 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ

По технологии термической обработки часто требуется охлаждение изделий с определенной скоростью, например, при отжиге, нормализации и закалке. Охлаждение изделий может осуществляться, на спокойном воздухе, в камерах с искусственной циркуляцией воздуха, в специальных герметических муфелях, в защитной атмосфере или в вакууме, в колодцах, вместе с нагревательной печью и в различных закалочных устройствах.

Данная работа заключается в определении времени охлаждения изделий на спокойном воздухе.

2.1. Цель работы

Рассчитать время охлаждения изделия на воздухе и сопоставить теоретические результаты с экспериментальными данными.

2.2. Материал исследования

Цилиндрические заготовки или образцы в виде параллелепипеда из конструкционных легированных сталей или цветных металлов и сплавов.

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Выписать химический состав и теплофизические свойства сталей и сплавов (приложение I, справочные данные).

2.3.2. Определить размеры заготовок, предназначенных для нагрева и последующего охлаждения.

2.3.3. Установить и закрепить термопары, фиксирующие температуру на поверхности и в центре заготовки.

2.3.4. Подключить термопары к модулю регистрации сигналов термопар «Triton6004TC» и включить его.

2.3.5. Осуществить загрузку заготовки или заготовок (согласно заданию) в камерную печь, нагретую до заданной температуры. Момент загрузки изделия в печь является началом отсчета времени нагрева.

2.3.6. Запустить программное обеспечение «DataRecorder-T6004TC», которое является частью аппаратно-программного комплекса, предназначенного для измерений на базе контроллера «TRITON-6004TC». Эта программа обеспечивает проведение измерений, визуализацию и предварительную обработку данных, сохранение результатов в файле на диске, печать графиков. *Для запуска установленной программы выберите ее пиктограмму в разделе меню «Пуск | Программы | DataRecorder» или на рабочем столе. После того как программа запустится, на экране появится окно, озаглавленное «DataRecorder» - это Центральное окно, отсюда с помощью меню и командных кнопок панели инструментов выполняется управление работой программы.*

2.3.6.1. Проверка или настройка программы.

Открыть меню «Настройка», после чего проверить настройки всех подменю.

2.3.6.2. В подменю «Конфигурация» проверить активность каналов (от первого до четвертого) и выбранные градуировки термопар. Следует отметить, что первый канал используется для регистрации температуры печи, а остальные для измерения температуры изделия.

2.3.6.3. В подменю «Тип измеряемых данных» установить измерение температуры и градуировку термопары ТП.

2.3.6.4. В подменю «Опорный сигнал» установить значение температуры свободных концов термопары (20...25°C).

2.3.6.5. В подменю «COM-порт» проверить или установить «COM3».

2.3.6.6. В подменю «Настройка графика» проверить или установить стиль, размер и цвет точек каждого канала.

2.3.6.7. Включить начало измерения в меню «Измерение» кнопкой «Старт» или F9.

2.3.6.8. После нагрева изделия до заданной температуры осуществить выгрузку заготовок на подготовленное место (керамическую плиту). Перед этим включить начало измерения температуры образца в меню «Измерение» кнопкой «Старт» или F9. Момент выгрузки изделия из печи является началом отсчета времени охлаждения.

2.3.6.9. После охлаждения изделия до заданной температуры остановить измерение кнопкой «СТОП».

2.3.6.10. Сохранить результаты измерения. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Сохранить как» сохранить под определенным именем. Результаты измерения можно сохранить также в виде файла Excel. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в Excel» сохранить под определенным именем в виде Excel файла. Для вывода графика нагрева или охлаждения в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в графический файл» сохранить под определенным именем.

2.3.6.11. Для печати графика нагрева или охлаждения в меню «Печать» измерение через подменю «Печать графиков» и подменю «Настройка печати» распечатать на принтере.

2.3.7. Загрузить в печь изделие другой формы или массивности, предварительно установив термопары на его поверхности и в центре, и осуществить нагрев и охлаждение следующего изделия до температуры; полученной при нагреве первого изделия повторив все пункты раздела 2.3.6.

2.3.8. Экспериментальные данные, распечатанные на принтере, обработать и занести в следующую таблицу.

Время, с	Температура, °C			Начальная температура изделия, °C	Заданная температура нагрева изделия, °C
	в печи	на поверхности изделия	в центре изделия		

2.3.9. Выполнить теоретический расчет времени охлаждения заготовки (или заготовок) согласно методике, изложенной в разделе 2.5 настоящей работы.

2.3.10. Построить кривые охлаждения в координатах $t-\tau$ и сопоставить теоретические кривые с экспериментальными.

2.3.11. Сделать выводы о возможности определения времени охлаждения загрузки расчетными методами.

2.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- химический состав и теплофизические свойства загрузки;
- расчет времени охлаждения загрузки;
- графики с теоретической и экспериментальной кривыми охлаждения;
- выводы по работе.

2.6. Техника безопасности

В процессе выполнения работы студенты должны соблюдать меры безопасности, изложенные в пункте 1.6 работы №1. Загрузка заготовок в печь и их выгрузка производится при выключенной печи специальными щипцами.

Подсоединение и отсоединение термопар осуществляется на холодных образцах (до нагрева их в печи; после охлаждения до комнатной температуры).

2.7. Контрольные вопросы

1. Виды теплопередачи в термических и нагревательных печах?
2. От каких условий зависит коэффициент передачи тепла конвекцией?
3. Что такое коэффициент излучения и степень черноты тела?
4. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
5. Теплотехнически «тонкие» и «массивные» изделия.
6. От чего зависит скорость охлаждения изделий?
7. Какие термопары используются при измерении температуры в различных температурных интервалах и почему?

Работа 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Предлагаемая работа позволяет оценить влияние теплофизических характеристик загрузки на скорость ее нагрева, а также сопоставить экспериментальные результаты по времени нагрева с расчетными данными.

3.1. Цель работы

Определить время нагрева изделий с различными теплофизическими характеристиками в электрической печи периодического действия расчетным и экспериментальным методами.

3.2. Материал исследования

Заготовки одинаковой формы и массы из легированных сталей и цветных металлов и сплавов.

Порядок выполнения работы, методические указания по расчету времени нагрева, требования к содержанию отчета и технике безопасности аналогичны изложенным в **РАБОТЕ №1** «Влияние формы и массивности изделий на продолжительность их нагрева в печах периодического действия».

В процессе выполнения работы студенты должны соблюдать меры безопасности, изложенные в пункте 1.6 **РАБОТЫ №1**. Загрузка заготовок в печь и их выгрузка производится при выключенной печи специальными щипцами.

Подсоединение и отсоединение термопар осуществляется на холодных образцах (до нагрева их в печи или после охлаждения до комнатной температуры).

3.3. Контрольные вопросы

1. Что характеризует суммарный коэффициент теплопередачи? В каких единицах измеряется этот коэффициент?
2. Дайте определение коэффициента теплопроводности.
3. Что такое теплоемкость? Как меняется теплоемкость с изменением температуры?

4. Как изменится коэффициент температуропроводности загрузки при увеличении теплоемкости; при уменьшении коэффициента теплопроводности?
5. Какая теплофизическая характеристика будет оказывать определяющее влияние на скорость нагрева «тонкой» загрузки одинаковой формы и массы?
6. Как влияет теплопроводность материала на продолжительность нагрева?

Работа 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УКЛАДКИ ПРИ НАГРЕВЕ САДКИ

Известно, что скорость нагрева садки зависит от удельного теплового потока, массы изделий, теплоемкости и эквивалентной поверхности нагреваемых изделий.

В предлагаемой лабораторной работе можно проследить, как изменяются характеристики нагрева при различной загрузке печи и сопоставить экспериментальные данные с теоретическими расчетами.

4.1. Цель работы

Определить время нагрева изделия и садки в камерной печи сопротивления и оценить коэффициент укладки (коэффициент времени нагрева).

4.2. Материал исследования

Заготовки в форме цилиндра или параллелепипеда из конструкционных легированных сталей.

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Выписать из справочников или приложения химический состав нагреваемой стали.

4.3.2. Выписать из справочника или приложения теплофизические характеристики стали.

4.3.3. Определить размеры нагреваемых заготовок.

4.3.4. Подключить термопары к модулю регистрации сигналов термопар «Triton6004TC» и включить его. Запустить программное обеспечение «DataRecorder-T6004TC» повторив все пункты раздела 1.3.5.1...1.3.5.7 **РАБОТЫ 1**.

4.3.5. Включить начало измерения в меню «Измерение» кнопкой «Старт» или F9.

4.3.5.1. Осуществить загрузку заготовки с термопарами в печь, нагретую до заданной температуры. Момент загрузки изделия в печь является началом отсчета времени нагрева.

4.3.5.2. После нагрева изделия до заданной температуры остановить измерение кнопкой «СТОП», выгрузить изделие из печи.

4.3.5.3. Сохранить результаты измерения. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Сохранить как» сохранить под определенным именем. Результаты измерения можно сохранить также в виде файла Excel. Для этого в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в Excel» сохранить под определенным именем в виде Excel файла. Для вывода графика нагрева или охлаждения в меню «Файл» измерение через подменю «Экспорт в графический файл» сохранить под определенным именем.

4.3.5.4. Для печати графика нагрева или охлаждения в меню «Печать» измерение через подменю «Печать графиков» и подменю «Настройка печати» распечатать на принтере.

4.3.6. Выгрузить изделие из печи.

4.3.7. Загрузить в печь садку (3-4 изделия квадратного или круглого сечения) с заданными промежутками между изделиями и осуществлять нагрев до требуемой температуры, полученной при первом нагреве, повторяя для регистрации температуры все пункты раздела 4.3.5.

4.3.8. Выгрузить изделия из печи.

4.3.9. Загрузить (если требуется по заданию) в печь новую партию изделий, изменив форму их загрузки. Например, если при первом нагреве изделия были расположены с зазором, то при втором нагреве их располагают без зазора. Для регистрации температуры повторить все пункты раздела 4.3.5.

4.3.10. Экспериментальные данные по нагреву изделия (садки), распечатанные на принтере, обработать и занести в следующую таблицу

Таблица

Время отсчета	Показания температуры, °С					Заданная температура нагрева, °С
	в печи	на поверхности изделия	на оси изделия	на поверхности крайнего изделия	начальная температура изделия, °С	

4.3.11. Определить влияние формы загрузки изделий в печи на продолжительность нагрева (вычислить коэффициент укладки, разделив время нагрева садки на время нагрева одного изделия).

4.3.12. Выполнить теоретический расчет времени нагрева изделия и садки по соответствующим формулам.

4.3.13. Сопоставить теоретические расчеты с экспериментальными результатами по нагреву изделия и садки и данными, имеющимися в литературе.

4.3.14. Сделать выводы о влиянии формы загрузки, способа укладки и расстояния между изделиями, на скорость и продолжительность нагрева.

4.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- а) цель работы;
- б) химический состав и теплофизические характеристики исследуемой стали;
- в) экспериментальные кривые нагрева изделия и садки;
- г) экспериментальные данные по нагреву в виде таблицы;
- д) расчеты времени нагрева изделия и садки;
- е) определение коэффициента укладки при выбранной схеме загрузки печи;
- ж) выводы по работе.

4.5. Техника безопасности

При проведении экспериментов необходимо выполнять требования по технике безопасности, изложенные в работе I.

4.6. Контрольные вопросы

1. Как влияет способ укладки нагреваемых изделий в печи на время их нагрева.
2. Дать определение времени нагрева «тонких» изделий в печах периодического действия.
3. Дать определение времени нагрева «массивных» изделий в печах периодического действия.
4. Представить расчет времени выдержки для выравнивания температуры по сечению изделия.
5. Как изменяются теплофизические свойства стали при нагреве?

Работа 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД

Скорость охлаждения при осуществлении закалки после определенного нагрева является главным параметром, формирующим структуру и свойства стальных изделий, Эффективность различных охлаждающих сред определяется их тепловыми характеристиками, скоростью движения, склонностью к образованию паровой оболочки на поверхности и рядом других факторов.

Перспективным направлением в изыскании новых закалочных сред является применение синтетических растворимых в воде присадок. Одной из таких закалочных сред, используемых в нашей промышленности, служит водный раствор полимера ПК-2 (содержащий полиакриловую кислоту) в количестве 1...1,5%.

Предлагаемая лабораторная работа позволяет оценить охлаждающую способность закалочной жидкости ПК-2 в зависимости от ее концентрации и температуры.

5.1. Цель работы

Определить охлаждающую способность жидкости ПК-2 в перлитно-трооститном и мартенситном интервале распада переохлажденного аустенита конструкционных сталей в зависимости от ее концентрации и температуры и выбрать закалочную жидкость для различных конструкционных сталей.

5.2. Материал исследования

Закалочная жидкость ПК-2 различной концентрации, дистиллированная вода.

5.3. Порядок выполнения работы

5.3.1. Используя литературу (10) определить для сталей, указанных в задании, температуру критических точек, температуру (T_{\min}) и время (τ_{\min}) минимальной устойчивости переохлажденного аустенита и рассчитать верхнюю критическую скорость закали ($V_{\text{вкз}}$). Полученные данные занести в следующую таблицу.

Таблица 5.3.1.

Марка стали	Ac1	Ac3	M _H	T _{min}	τ_{\min}	V _{вкз}
	°C				К/с	

5.3.2. Ознакомиться с технической характеристикой, устройством и принципом действия прибора для измерения закалочной способности жидкости ПК-2 (техническое описание и инструкция по эксплуатации).

5.3.3. Переключатель «Режим» установить в положение «Автомат», включить тумблер «Сеть», резистором «Установка нижнего предела» установить нижний предел температуры датчика 200 °C и прогреть прибор в течении 15-20 минут.

5.3.4. Нажать кнопку «Пуск» и поднять флажок датчика, закрыть заслонку муфельной печи.

5.3.5. Произвести не менее 5 замеров времени охлаждения датчика от температуры 800 до 200 °C в дистиллированной воде и в жидкости ПК-2 неизвестных концентраций. Найти среднестатистическое значение времени охлаждения датчика в воде ($\tau_{\text{вод.}}$) и в жидкости ПК-2 ($\tau_{\text{ПК-2}}$) различных концентраций.

5.3.6. Определить соотношение $\tau_{\text{ПК-2}} / \tau_{\text{вод.}}$ для жидкостей ПК-2. 5.3.7. Произвести не менее трех замеров времени охлаждения датчика от температуры 800 до 200 °C в закалочных жидкостях с различной концентрацией ПК-2, определенных по п.5.3.6. при температурах жидкостей 25, 50, 75, 100 °C. 5.3.8. Экспериментальные данные занести в следующую таблицу.

Таблица 5.3.2.

Охлаждающая способность жидкости ПК-2 в зависимости от ее концентрации и температуры в интервале температур охлаждения 800 ...200 °С

Концентрация жидкости ПК-2, %	Температура жидкости ПК-2, °С	Время охлаждения, с	Скорость охлаждения, К/с

5.3.9. Переключателем «Установка нижнего предела» установить нижний предел температуры датчика на отметку 500 °С, нажать кнопку «Пуск» и закрыть заслонку муфельной печи. Произвести не менее пяти замеров времени охлаждения датчика от 800 до 500 °С в жидкости ПК-2 различной концентрации полимера при температурах 25, 50, 75, 100 °С.

5.3.10. Найти среднестатистическое значение времени охлаждения датчика в закалочной жидкости ПК-2 в зависимости от концентрации полимера и температуры.

5.3.11. Переключатель «Режим» установить в положение «Руч»; резистором «Установка нижнего предела» установить нижний предел температуры датчика на отметку 200 °С. Нажать кнопку «Пуск» и наблюдать изменение температуры датчика. При достижении температуры 400 °С нажать кнопку «Ручной запуск». Произвести не менее пяти замеров времени охлаждения датчика от температуры 400 до 200 °С и при температурах 25, 50, 75, 100 °С. Найти среднестатистическое значение времени охлаждения датчика от 400 до 200 °С в жидкости ПК-2 при ее различных концентрациях и температурах.

5.3.12. Экспериментальные данные обработать и занести в следующую таблицу.

Таблица 5.3.3.

Охлаждающая способность жидкости ПК-2 в интервалах температур 800 ÷ 500 и 400 ÷ 200 °С в зависимости от ее концентрации и температуры

Концентрация жидкости ПК-2, %	Температура жидкости ПК-2, °С	Время охлаждения, с		Скорость охлаждения, К/с	
		от 800 до 500 °С	от 400 до 200 °С	от 800 до 500 °С	от 400 до 200 °С
	25				

5.3.13. Сделать выводы о зависимости охлаждающей способности жидкости ПК-2 от ее концентрации и температуры. Используя известные данные (приложение 3, табл. П 3.2), произвести сравнительную оценку закалочной способности воды, масла, ПК-2 и выбрать охлаждающую среду для осуществления закалки сталей, указанных в задании.

5.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- а) цель работы;
- б) химический состав и данные о кинетике изотермического распада переохлажденного аустенита сталей, для которых производится выбор закалочной среды;
- в) экспериментальные данные по определению закалочной способности жидкости ПК-2 в зависимости от ее концентрации и температуры;
- г) расчеты критической скорости закалки;
- д) выводы по работе.

5.5. Методические указания

5.5.1. Краткое описание устройства и работы прибора для определения закалочной способности жидкости ПК-2.

Прибор состоит из пульта управления и функционального блока. На лицевой панели пульта управления расположены: измерительный прибор (милливольтметр), регулировочные резисторы «Балансировка» (750, 800, «калибровка», «нижний предел»), переключатель «Нагрев», светодиоды «Напряжение», индикаторы «Время охлаждения», переключатели «Сеть», «Режим», «Ручной запуск», «Пуск».

Функциональный блок состоит из кронштейна, на котором закреплены два электромагнита и муфельная печь. Датчик со встроенной термопарой укреплен на трубке, располагающейся по оси муфельной печи и крепится к кронштейну при помощи электромагнита. Муфельная печь закрывается заслонкой, управляемой электромагнитом. Под муфельной заслонкой располагается емкость с закалочной жидкостью.

Электрическая схема функционально разделена на 4 части:

- а) блок питания;
- б) блок измерения температуры;
- в) блок автоматики;
- г) блок измерения времени.

Схема прибора рассчитана на работу в ручном и автоматическом режимах.

При работе в автоматическом режиме переключатель «Режим» устанавливают в положение «Автомат», нажимают кнопку «Пуск», поднимают флажок датчика и закрывают заслонку муфельной печи. При этом датчик находится в муфельной печи, на нагревательную спираль которой подается напряжение, и фиксируется в этом положении одним из двух электромагнитов. Второй электромагнит удерживает заслонку печи в закрытом положении до тех пор, пока температура датчика не достигнет 750 °С, после чего электромагнит обесточивается и происходит открытие заслонки. Изменение температуры датчика фиксируется измерительным прибором. При увеличении температуры датчика до 800 °С обесточивается электромагнит, удерживающий датчик в муфельной печи. Датчик падает в закалочную среду. Одновременно происходит отсчет времени остывания датчика от температуры 800 °С до температуры нижнего предела с регистрацией времени охлаждения на световом табло. Как только температура

датчика достигнет установленной температуры нижнего предела отсчет времени охлаждения прекращается.

При работе в ручном режиме переключатель «Режим» устанавливают в положение «Руч», нажимают кнопку «Пуск» и поднимают флажок датчика, который удерживается в печи с помощью электромагнита. Второй электромагнит при этом обесточен и заслонка печи открыта. За ростом температуры датчика наблюдают по измерительному прибору.

При достижении датчиком нужной температуры нажимают кнопку «Ручной запуск». Электромагнит, удерживающий датчик в печи обесточивается и датчик падает в закалочную жидкость. После охлаждения до установленной температуры нижнего предела на цифровом табло фиксируется время охлаждения.

5.5.2. Определение верхней критической скорости закалки

Верхней критической скоростью закалки является минимальная скорость охлаждения, обеспечивающая подавление распада переохлажденного аустенита как в перлитной, так и в бейнитной области. Верхнюю критическую скорость закалки можно определить из следующего выражения:

$$V_{\text{вкз}} = \frac{A_1 - t_{\text{min}}}{1,5\tau_{\text{min}}} \quad (5.1)$$

где A_1 - температура критической точки, К;

t_{min} - температура минимальной устойчивости аустенита, К;

τ_{min} - время минимальной устойчивости аустенита, с ;

1,5 - поправочный коэффициент, учитывающий непрерывность охлаждения.

A_1 , t_{min} , τ_{min} определяют по диаграммам кинетики изотермического распада переохлажденного аустенита, используя литературные данные, например (10).

5.5.3. Определение скорости охлаждения датчика в жидкости ПК-2 различной концентрации и температуры.

Для определения скорости охлаждения датчика от температуры нагрева до температуры нижнего предела используют формулу:

$$V = \frac{t_1 - t_2}{\tau_i} \quad (5.2)$$

где t_1 - температура нагрева датчика, °С;

t_2 - температура нижнего предела, °С;

- экспериментальное значение среднестатистического времени охлаждения датчика от t_1 до t_2 в жидкости ПК-2 с определенной концентрацией (ПК-2; %) и температурой (), с

5.6. Техника безопасности

При выполнении работы необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием. Студент допускается к выполнению работы после изучения технического описания и инструкции по эксплуатации прибора для определения закалочной способности жидкости ПК-2.

5.7. Контрольные вопросы

1. Закаливаемость. От чего зависит эта характеристика?
2. От каких факторов зависит охлаждающая способность закалочной среды?
3. Какими свойствами должна обладать «идеальная» закалочная среда?
4. В чем достоинство и недостатки воды и масла как закалочных сред?
5. Как влияет температура воды и масла на их закаливающую способность?
6. Какие закалочные среды изменяют свое агрегатное состояние при закалке?
7. Чем можно объяснить получение «пятнистой» твердости при закалке среднеуглеродистой стали в воде?
8. Как зависит закаливающая способность охладителя от продолжительности стадии пузырькового кипения?
9. Какая вода, дистиллированная или водопроводная, обладает большей закаливающей способностью?
10. Как зависит охлаждающая способность масла от его вязкости?
11. Дайте определение верхней критической скорости закалки. От чего зависит эта характеристика? Как рассчитать критическую скорость закалки?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

П.1.1. Плотность γ и коэффициент теплопроводности λ некоторых металлов и сплавов [1,3,5]

Металл или сплав	γ , кг/м ³ при 20°C	λ , Вт/(м·К), при температуре, °C					
		20	200	400	600	800	1000
Железо	7880	72	65	53	41	30	28
Сталь 08 кп	7850	66	56	45	37	29	27
У10	7830	46	44	37	31	24	26
Низколегированные стали							
50Г, 40Х, 40ХС	7830	49	45	40	34	27	24
ШХ15, 9ХС	7800	43	40	35	30	27	—
30ХГС, 20ХН3А	7840	40	36	33	29	27	—
30ХН3М	7830	38	36	36	32	27	28
Высоколегированные стали							
Р18, Р6М5	8690	24	27	28	27	26	28
3Х13, 3Х2В8	8200	25	27	27	26	25	27
Х18Н9	7920	16	17	20	24	27	28
Цветные металлы и сплавы							
Алюминий	2700	210	220	249	—	—	—
Дуралюминий	2750	160	194	260	—	—	—
Медь	8940	390	378	365	354	333	—
Титан	4540	15,2	16,3	17,51	—	—	—

П.1.2. Средняя теплоемкость некоторых металлов, сталей и сплавов в интервале температур от 0 до t , °C, кДж/(кг·K) [1, 4]

Металл или сплав	Температура, °C								
	100	200	300	400	600	700	800	900	1000
Углеродистые стали	0,486	0,507	0,503	0,540	0,590	0,620	0,695	0,695	0,691
Низколегированные стали	0,486	0,502	0,519	0,536	0,586	0,645	0,695	0,687	0,674
Жаростойкие и жаропрочные стали:									
хромистые	0,469	0,486	0,507	0,532	0,599	0,636	0,682	—	—
хромоникелевые	0,502	0,511	0,523	0,536	0,553	0,561	0,569	0,574	0,582
Алюминий	0,913	0,938	0,955	0,979	1,022	—	—	—	—
Медь	0,394	0,398	0,402	0,406	0,414	0,419	0,423	0,428	0,435

П.1.3. Степень черноты ε для различных материалов [3,5]

Наименование	Температура, °C	ε
Алюминий полированный	225...575	0,039...0,057
Алюминий шероховатый	20	0,055
Алюминий, окисленный при 600°C	200...600	0,11...0,19
Асбест в виде картона и бумаги	20...470	0,93...0,96
Железо полированное	425...1020	0,144...0,377
Железо литое необработанное	900...1100	0,87...0,95
Железо окисленное	125...525	0,78...0,82
Железо горячекатаное	130	0,6
Графит искусственный	1000...2800	0,77...0,83
Сталь листовая шлифованная	940...1100	0,55...0,61
Сталь, окисленная при 600°C	200...600	0,8
Сталь оцинкованная блестящая	20	0,23
Сталь оцинкованная окисленная	20	0,28
Сталь полированная	740...1040	0,52...0,56
Кирпич красный	20	0,93
Кирпич шамотный шероховатый	20	0,80...0,90
Латунь с тусклой поверхностью	50...350	0,22
Латунь, окисленная при 600°C	20...600	0,6
Медь электролитическая полированная	20...800	0,025...0,061
Медь, окисленная при 600°C	20...600	0,57...0,87

П.2. Модуль регистрации сигналов термопар «Triton6004TC» и порядок работы с программным обеспечением [7,8,9]

Модуль «Triton6004TC» предназначен для регистрации температуры по 16 каналам при помощи термопар и автоматической компенсации температуры холодного спая.

Модуль представляет собой функционально законченное корпусное изделие. Модуль собран в пластиковом ударопрочном корпусе класса защиты IP-66. Корпус состоит из нижней и верхней крышек. В нижней крышке вмонтированы разъемы и органы управления, необходимые для функционирования модуля.

В состав модуля входит коммутатор, микроконтроллер, АЦП, гальваническая развязка, ЖКИ, органы управления (две кнопки), интерфейс RS-232 (USB) и источник питания. Структурная схема модуля приведена на рис. П1.

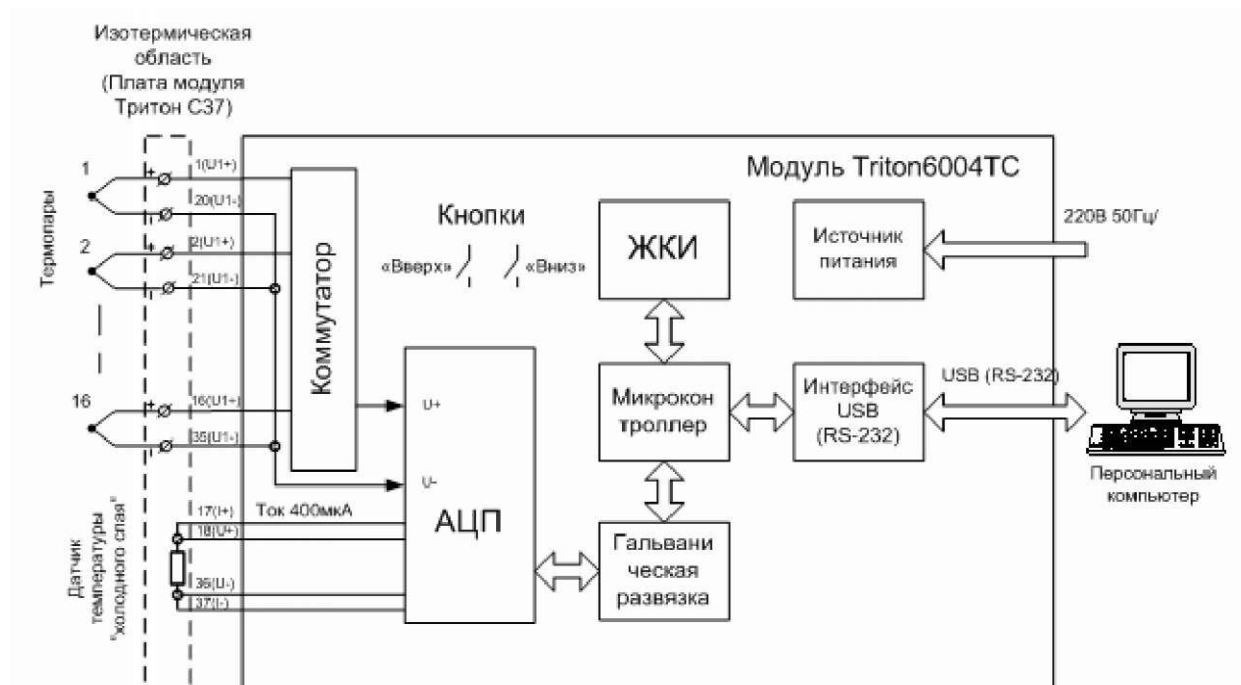


Рис. П1. Структурная схема модуля для регистрации температуры «Triton6004TC».

Работой модуля управляет встроенный микроконтроллер PIC18F452. Он управляет аппаратными средствами модуля - АЦП и интерфейсом RS-232(USB). Вычислительные способности микроконтроллера используются для расчета температуры, контролируемой термопарами, компенсации температуры «холодного спая». При расчетах используется полиномиальная аппроксимация характеристик термопар и датчика терморезисторного типа.

С помощью 24-битного сигма-дельта АЦП (AD7719) модуль определяет величину термо-ЭДС, подключенных к нему термопар или других источников напряжения и измеряет падение напряжения на датчике температуры холодного спая, при пропускании через него стабильного тока 400 мкА.

Электронный коммутатор служит для поочередного подключения термопар к АЦП. К модулю могут быть подключены до 16 термопар или других источников напряжения. Коммутируются только положительные цепи термопар, при этом отрицательные цепи имеют общую точку.

Результаты преобразования в виде температур «горячих» концов термопар (каналы 1-16) и температуры их «холодных» концов (17-й канал) выводятся на встроенный жидко-кристаллический дисплей (ЖКИ) модуля. В каждой строке может одновременно отображаться только одно значение. Соответственно для одновременного просмотра доступно только четыре соседние значения температуры. Кнопки «Вверх» и «Вниз» служат для выбора необходимых значений.

Расположение и разъемов и органов управления представлено на рис. П2.

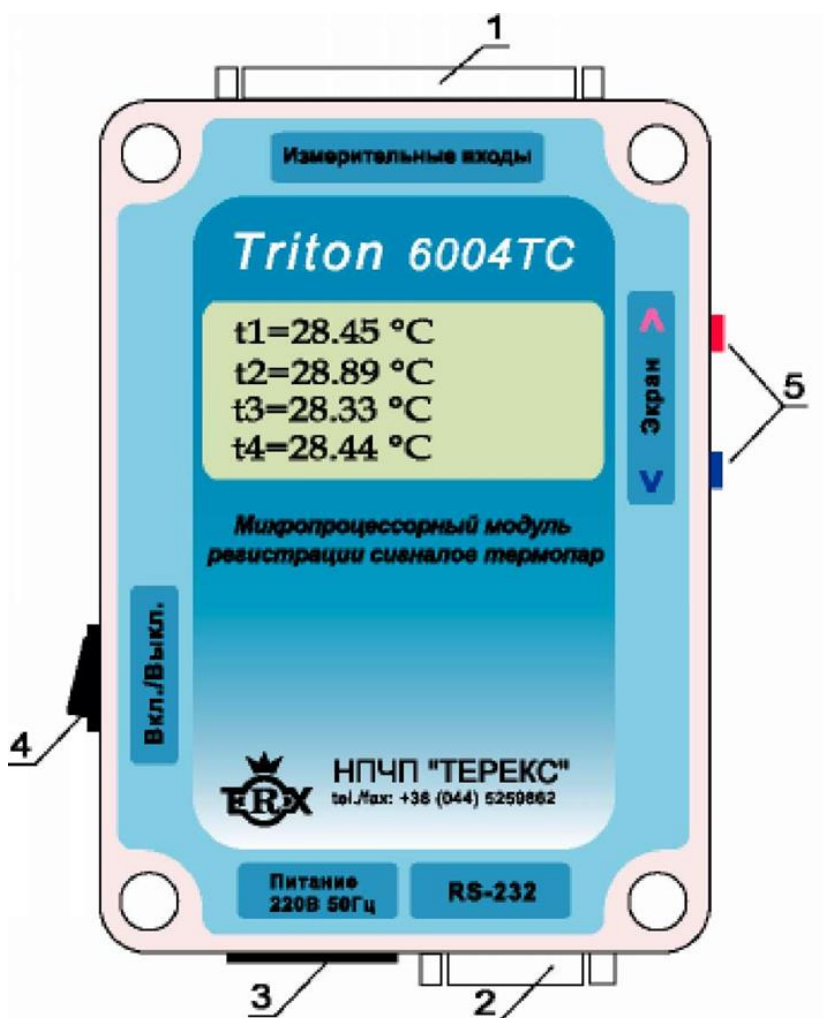


Рис. П2. Расположение разъемов и органов управления схема модуля для регистрации температуры «Triton6004TC».

1 - Разъем для подключения датчиков (термопар и компенсации); 2 - разъем для подключения интерфейса RS-232 или USB; 3 - разъем для подключения сети 220В 50Гц; 4 - выключатель питания; 5 - кнопки выбора отображения датчиков на дисплее модуля.

Модуль может работать автономно, и в составе аппаратно-программного комплекса совместно с компьютером.

Работа модуля в аппаратно-программном комплексе осуществляется при помощи программы «DataRecorder-T6004TC». Программа производит считывание в реальном времени показаний модуля, рисует графики зависимости измерений по времени, сохраняет результаты, выводит на печать и т.д. Руководство пользователя по работе с программой «DataRecorder-T6004TC» находится в директории в которую была установлена программа в папке «Дос» в файле «DataRecorder_Base.doc».

При необходимости нужно установить необходимые для конкретных измерений диапазон измеряемых напряжений, коэффициенты аппроксимирующих полиномов для пересчета напряжения в температуру (для основных термопар) и сопротивления в температуру (для канала опорного спая). Файлы с полиномами находятся в папке с установленной программой в директории «Grad». Файлы с полиномами имеют название, соответствующее типу термопары и диапазону, в котором проводилась аппроксимация, например «TC(XK_L(- 20_+650)).ptk» или «TC(XA_K(0_+1500)).ptk». Файлы с коэффициентами полинома для датчиков температуры опорного спая имеют обозначение «R(700-101BAB).ptk» и «R(700-102BAB).ptk» для 100-омного и 1000-омного платиновых термометров сопротивления соответственно. Если основными каналами измеряется только напряжение, то выбирается файл с «единичным» полиномом «U(V).ptk» (отображение измерений в вольтах), «U(mV).ptk» (отображение измерений в милливольтках), или «U(uV).ptk» (отображение в микровольтах). При этом измерения опорного канала не влияют на основные каналы. Если для опорного канала выбрать файл «R(Ohm).ptk», то будет отображаться сопротивление опорного термометра в Омах.

В автономном режиме показания считываются с ЖК индикатора. Диапазон выводимых на дисплей каналов выбирается кнопками «Вверх» и «Вниз».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчеты термических печей: Учебное пособие /Ю.Д.Корягин. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 178 с.
2. Корягин Ю.Д. Тепловые расчеты термического оборудования и автоматическое регулирование пламенных печей: учебное пособие / Ю.Д.Корягин, С.И. Ильин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 111 с.
3. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Т2.: Матрюков Б.С. Расчеты металлургических печей: Учебник. – М.: Металлургия, 1986. – 272с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 368с.
5. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей: Учебник для техникумов. – М.: Энергия, 1977, - 304с.
6. Расчет нагревательных и термических печей: Справочное издание./Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др.//Под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. – М.: Металлургия, 1983. – 480с.
7. T6004TC_АТФА.426449.011РЭ.pdf – «Модуль регистрации сигналов термопар «Triton6004TC» . Руководство по эксплуатации.»
8. TC6004TC_protocol_АТФА.426449.011.pdf – «Модуль регистрации сигналов термопар «Triton6004TC». Приложение».
9. TC37_АТФА.687253.001ПС.pdf - «Модуль коммутационный «Triton C37». Паспорт».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Основные условные обозначения	5
1.Расчеты времени нагрева и охлаждения металла при термической обработке	6
1.1.Теоретические основы нагрева металла в печах	6
1.2.Особенности расчёта суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических печах	8
2.Определение времени нагрева изделий в термических печах с постоянной температурой	11
	12
3. <u>Методика выполнения лабораторных работ</u>	
3.1. Работа 1. Влияние формы и массивности изделий на продолжительность их нагрева в печах периодического действия	12
3.2.Работа 2. Определение времени охлаждения загрузки при постоянной температуре охлаждающей среды	15
3.3.Работа 3.Определение времени нагрева изделий с различными теплофизическими характеристиками	18
3.4. Работа 4. Определение коэффициента укладки при нагреве садки	19
3.5.Работа 5. Определение охлаждающей способности различных закалочных сред	21
Приложения	26
Приложение П1.1. Плотность γ и коэффициент теплопроводности λ некоторых металлов и сплавов	26
Приложение П1.2. Средняя теплоемкость некоторых металлов, сталей и сплавов в интервале температур от 0 до t	27
Приложение П1.3. Степень черноты ε для различных материалов	27
Приложение П2. Модуль регистрации сигналов термопар «Triton6004ТС» и порядок работы с программным обеспечением.	28
Библиографический список	31