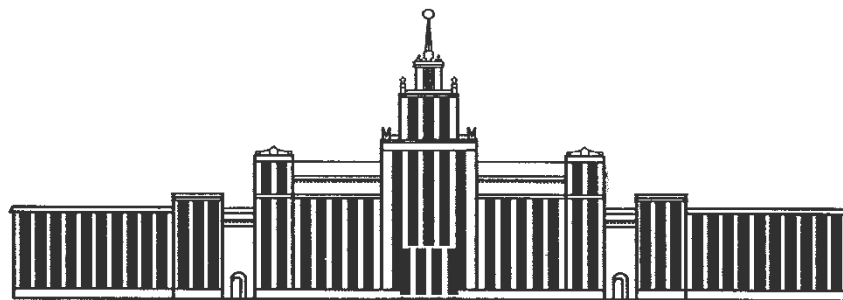

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

621.78(07)
К709

Ю.Д. Корягин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Учебное пособие
к курсовому проектированию

Челябинск
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

621.78(07)
K709

Ю.Д. Корягин

Проектирование термических подразделений

Учебное пособие
к курсовому проектированию

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2016

УДК 621.78(07)
К709

*Одобрено
учебно-методической комиссией
факультета материаловедения и металлургических технологий*

*Рецензенты:
проф., д.т.н. Рябчиков И.В., проф. д.т.н. Выдрин А.В.*

Корягин Ю.Д.

К709 Проектирование термических подразделений: учебное пособие к курсовому проектированию /Ю.Д.Корягин . – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 78 с.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров дневной и заочной формы обучения по направлению «Металлургия», в учебных планах которых рассматриваются вопросы применения и расчета термического и нагревательного оборудования. Пособие содержит требования к содержанию и оформлению расчетно-пояснительных записок и графических материалов курсовых проектов, а также методики расчетов и необходимые справочные материалы.

УДК УДК 621.78(07)

Издательский центр ЮУрГУ, 2016.

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект выполняется студентами, обучающимися по направлениям подготовки «Металлургия» и «Материаловедение и технологии материалов», после завершения производственной практики и прослушивания курсов «Материаловедение», «Тепломассообмен» и «Основы технологического процесса термической обработки».

В процессе работы над проектом и при последующей его защите перед комиссией студент должен показать умение самостоятельно решить технические вопросы производства: проектирование технологических процессов, расчет и конструирование оборудования. Разработка указанных вопросов должна производиться с использованием теоретических знаний, полученных при изучении курсов металлургического цикла.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КУРСОВОМ ПРОЕКТЕ

1.1. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из расчётно-пояснительной записки объемом 40-50 страниц рукописного текста и графической части (2,5...3,0 листа формата А1).

Расчётно-пояснительная записка включает в себя:

- титульный лист;
- задание;
- аннотацию или реферат;
- оглавление;
- сравнение отечественных и зарубежных технологий и решений;
- технологическую часть;
- выбор, описание и расчет оборудования;
- планировка участка (отделения);
- библиографический список;
- приложение.

Правила оформления титульного листа, аннотации, оглавления, введения, разделов пояснительной записки, графического материала и списка используемой литературы даны в стандарте предприятия «Курсовая и выпускная квалификационная работа. Требования к содержанию и оформлению. СТП ЮУрГУ 21-2008» [1].

Графическая часть курсового проекта содержит следующие чертежи:

- нагревательного устройства или печи – 1...2 листа;
- режим термической обработки и свойства стали – 0,5...1 лист;
- планировку участка или отделения – 0,5 листа.

— химический состав стали и диаграмма распада переохлажденного аустенита – 0,5...1 лист

1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

При выполнении этого раздела студент выбирает материал и оптимальный технологический процесс его термической обработки, обеспечивающие получение высококачественной продукции при минимальной стоимости обработки. Данный раздел включает в себя следующие основные подразделы:

- краткое описание условий работы деталей или назначение металлургических полуфабрикатов;
- комплекс требований, предъявляемых к материалу детали или полуфабриката;
- обоснование выбора марки материала;
- обоснование режима термической обработки деталей или полуфабрикатов из выбранной марки материала;
- анализ возможных видов брака, связанных с технологическим процессом термической обработки и меры по предупреждению брака;
- объём, средства и методика контроля качества продукции.

При анализе условий работы изделия учитываются:

- величина максимальной нагрузки, которая может действовать на изделие в условиях эксплуатации;
- характер приложения нагрузки (динамическая, статическая, знакопеременная, контактная и т.д.);
- температурные условия работы изделия (температурный интервал, постоянство температурного воздействия и т.п.);
- наличие агрессивной среды;
- тип трения (скольжение или качение), испытываемого изделием в процессе эксплуатации;
- характер износа изделия (абразивный, окислительный и др.).

На основе анализа условий работы изделия разрабатываются предъявляемые к материалу требования, обеспечивающие максимальную долговечность и наилучшую работоспособность конструкции.

При выборе материала учитываются следующие факторы:

- выбранная марка материала должна обеспечить после термической обработки изделия получение такого комплекса механических и служебных свойств, который обеспечит необходимую надежность и долговечность данного изделия в условиях эксплуатации;
- выбранная марка сплава должна необходимыми хорошими технологическими свойствами;
- выбранная марка материала должна быть относительно дешевой в металлургическом производстве и экономически выгодной в

машиностроении, т. е. обеспечивать минимальную трудоемкость обработки и минимальный расход вспомогательных материалов, топлива и электроэнергии.

Выбор материала осуществляется на основании сравнительного анализа физических, механических и технологических свойств двух-трех марок сталей (сплавов), из которых изготавливаются аналогичные детали других моделей машин и оборудования.

Выбранную марку материала характеризуют по следующим показателям:

- по химическому составу (описывают влияние легирующих элементов на структуру, свойства и критические точки стали);
- по механическим и физическим свойствам;
- по теплостойкости, жаропрочности, термической стойкости, износостойкости;
- по технологическим свойствам при различных видах обработки;
- по химической стойкости и т.п.

Все перечисленные характеристики свойств должны иллюстрироваться диаграммами и графиками. Далее для выбранной детали назначаются и обосновываются технологические режимы термической обработки. Приводится график термообработки и составляется технологическая карта термической обработки конкретной детали. В технологической карте термической обработки должны быть предусмотрены вспомогательные (очистка деталей от окалины и масла, правка) и контрольные (определение твердости, глубины слоя после химико-термической обработки и др.) операции. Здесь же может быть приведена маршрутная технология изготовления данной детали или полуфабриката.

В этом разделе приводятся виды возможного брака деталей и мероприятия по его исправлению и предотвращению.

Объем технологической части курсового проекта 15...20 страниц.

1.3. ВЫБОР И ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Основанием для выбора и расчета количества технологического оборудования служат годовая программа, эффективный фонд времени работы оборудования и его производительность.

В этот раздел входят:

- выбор и краткое описание основного, дополнительного и вспомогательного оборудования;
- описание разработанных в проекте конструкций;
- технологические и технические характеристики разработанного и стандартного оборудования;
- расчеты основного и вспомогательного оборудования;

Выбор оборудования проводят путем сопоставления 2...3 типов нагревательных, охлаждающих и вспомогательных устройств, пригодных для выполнения принятых в проекте операций термической обработки, и обосновываются применение наиболее экономичных и совершенных в техническом отношении конструкций, контролируемых атмосфер и охлаждающих сред. Технические характеристики проектированного и выбранного по справочникам оборудования приводятся в виде таблиц, которые можно вынести в приложение.

Затем выполняют расчеты времени и нагрева деталей, теплотехнические расчеты термических печей и установок, расчеты нагревателей и горения газового топлива.

2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

2.1. 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. Для нагрева при термической обработке изделий из стали и сплавов применяются как электрические, так и топливные печи.

2.1.1. Теоретические основы нагрева металла в печах

На поверхности нагреваемого в печи изделия протекает сложный тепловой процесс, включающий все виды 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 садки 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».

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. Для уменьшения погрешности расчётов следует брать средние в рассматриваемом интервале температур значения теплофизических констант.

2.1.2. Особенности расчёта суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических и топливных печах

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

Электрические печи. 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 приблизительно 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:

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:

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

где k — коэффициент, зависящий от температуры печи:

Температура печи, °C	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, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{ПН}}$ 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, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

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

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мсп}}}{100}\right)^4}{T_{\text{п}} - T_{\text{мсп}}}, \quad (9)$$

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

$$T_{\text{мсп}} = 1/3 (t_{\text{мн}} + 2 t_{\text{мк}}) + 273, \quad (10)$$

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

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

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

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

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

Топливные печи. Дымовые газы, заполняющие рабочее пространство топливной печи, передают тепло лучеиспусканием и конвекцией нагреваемым изделиям и стенкам печи. Последние излучают тепло на изделия. Все эти процессы учитываются при определении коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 K \varepsilon_{\text{М}} \frac{\left(\frac{T_{\Gamma}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{Мср}}}{100}\right)^4}{T_{\Gamma} - T_{\text{Мср}}}, \quad (13)$$

где T_{Γ} — температура дымовых газов в рабочем пространстве печи, К; $T_{\text{Мср}}$ — средняя температура нагреваемого металла, К; $\varepsilon_{\text{М}}$ — степень черноты поверхности изделия; K — коэффициент, учитывающий взаимные процессы лучеиспускания дымовых газов, изделия и стенок печи.

По данным Г.Л.Поляка, коэффициент K выражается формулой:

$$K = \frac{(1 - \varepsilon_{\Gamma}) + \omega}{\left[\varepsilon_{\text{М}} + \varepsilon_{\Gamma} (1 - \varepsilon_{\text{М}}) \right] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\Gamma}}{\varepsilon_{\Gamma}} + \omega}, \quad (14)$$

где ε_{Γ} — степень черноты дымовых газов, ω — степень развития кладки, её численное значение приблизительно равно отношению суммарной внутренней поверхности стенок и свода печи F_{Π} к воспринимающей тепловое излучение поверхности металла $F_{\text{М}}$:

$$\omega = \frac{F_{\Pi}}{F_{\text{М}}}. \quad (15)$$

Степень черноты дымовых газов зависит от их состава. В состав печных дымовых газов в основном входят азот (N_2), углекислый газ (CO_2) и водяной пар (H_2O).

Одно- и двухатомные газы имеют ничтожно малую интенсивность теплового излучения. Поэтому степень черноты дымовых газов определяется из выражения:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (16)$$

где $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ — степень черноты углекислого газа; $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ — условная степень черноты водяного пара; β — поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара.

Степень черноты газа зависит от его температуры, парциального давления p и средней эффективной длины лучей $S_{\text{эф}}$ в рассматриваемом газовом объеме. Величина p , Н/см²(атм) численно равна объёмной доле газа в составе продуктов горения. Величину $S_{\text{эф}}$ приближенно можно определить из выражения:

$$S_{\text{ЭФ}} = (0,8 \dots 0,9) \cdot \frac{4V}{F}, \text{ м}, \quad (17)$$

где V — объём, заполненный излучающим газом, м^3 ; F — площадь всех стенок, ограничивающих этот объём, м^2 .

Для определения степени черноты ϵ_{CO_2} и $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ и коэффициента β применяются номограммы (рис. 1).

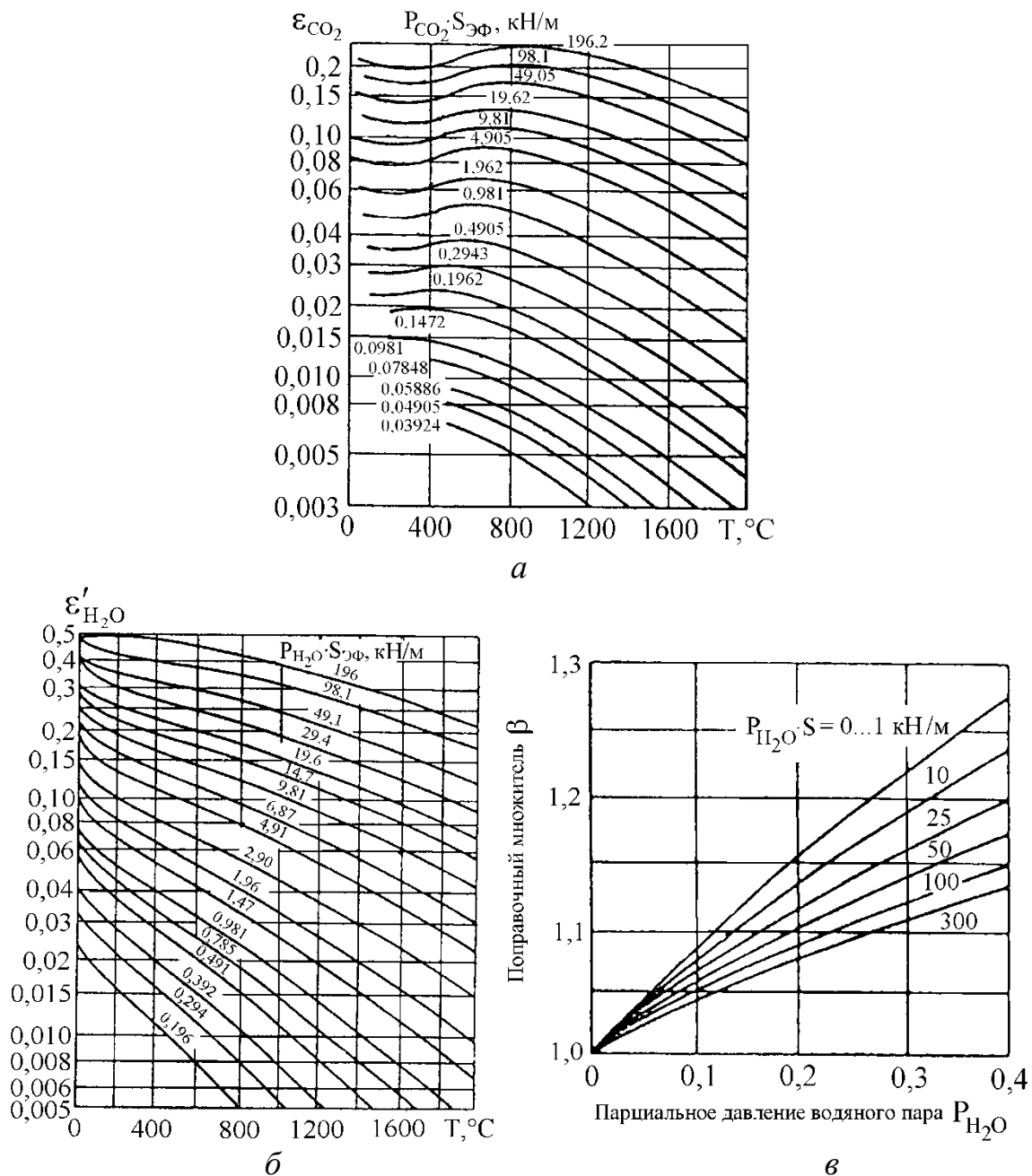


Рис. 1. Номограммы для определения степени черноты CO_2 (а), H_2O (б) и поправочного коэффициента β (в)

Множитель K в зависимости от степени черноты печных газов и степени развития кладки при $\beta^*=0,85$ и $\beta^*=0,95$, где $\beta^*=\varepsilon_M+\varepsilon_\Gamma(1-\varepsilon_M)$, можно определить по графику, предложенному Д.В.Будриным (рис.2).

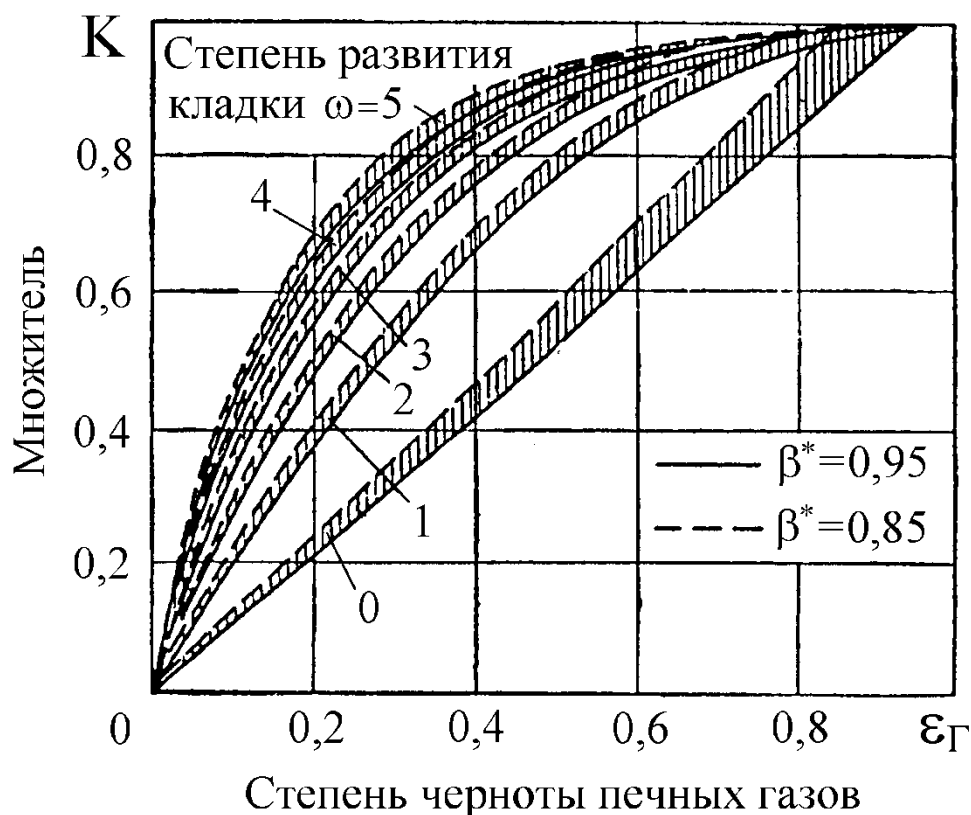


Рис. 2. График для расчёта множителя K

Таким образом, приведенный коэффициент излучения газа, кладки и металла, входящий в формулу коэффициента теплоотдачи излучением, зависит от степени черноты металла и газов и степени развития кладки. Его значение будет увеличиваться при повышении ε_M и ε_Γ и степени развития кладки (то есть при увеличении F_Π и уменьшении F_M).

При нагреве в пламенных печах с $\varepsilon_M=0,8$, $\varepsilon_\Gamma=0,30\ldots 0,35$ и $\omega=3,0\ldots 3,5$ значение произведения $5,67 \cdot \varepsilon_M \cdot K = C_{ГКМ} = 2,7\ldots 3,3$. При нагреве в защитной атмосфере (ПС–0,6) $C_{ГКМ}=1,4$, а для атмосферы ДА — $C_{ГКМ}=1,2$.

Интенсивность конвективного теплообмена в рабочем пространстве печи зависит от скорости движения дымовых газов, а также от их физических свойств, формы и размеров нагреваемых изделий, температуры газов и кладки. Для среднетемпературных печей, не имеющих принудительной циркуляции печной атмосферы, он может быть принят равным $10\ldots 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При вынужденном движении воздуха или дымовых газов в каналах в условиях наиболее характерного для печей турбулентного режима коэффициент теплоотдачи конвекцией равен:

$$\alpha_K = Z \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}} K_L K_{H_2O}, \quad (18)$$

где w — скорость движения газов, м/с; d — эквивалентный диаметр канала (для каналов круглого сечения $d = 4S/P$, м; здесь S — площадь сечения канала, м²; P — периметр сечения, м); Z — коэффициент, зависящий от температуры дымовых газов, а именно:

$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	600	800	1000	1200	1400
Z	1,99	1,77	1,61	1,48	1,39

K_L — коэффициент, зависящий от отношения длины канала L к его диаметру d :

L/d	2	5	10	15	20	30	40	50
K_L	1,40	1,24	1,14	1,09	1,07	1,04	1,02	1,00

K_{H_2O} — коэффициент, величина которого зависит от содержания водяных паров в дымовых газах или воздушном потоке:

$H_2O, \%$	0	2	5	10	15	20	25	30
K_{H_2O}	1,00	1,18	1,24	1,29	1,34	1,39	1,43	1,47

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при турбулентном движении воздуха или продуктов сгорания в каналах можно определить также с помощью следующей приближенной формулы:

$$\alpha_K = 4,42 \frac{w_0^{0,75}}{d^{0,25}}, \quad (19)$$

где w_0 — приведённая (0 °С; $1,013 \cdot 10^5$ Н/м² или 760 мм рт.ст.) скорость движения газов, м/с; d — эквивалентный диаметр канала, м.

Если известна скорость газов w при температуре t , °C, то

$$w_0 = \frac{273}{273 + t} w. \quad (20)$$

Для вынужденного движения газов вдоль плоской поверхности при приближённых расчётах коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется по следующим формулам [2, 6]:

а) при скорости движения газов $w_0 \leq 4,65$ м/с:

для прокатанной поверхности $\alpha_K = 5,81 + 4,25 w_0$,

для шероховатой поверхности $\alpha_K = 6,16 + 4,49 w_0$;

б) при скорости движения газов $w_0 > 4,65$ м/с:

для прокатанной поверхности $\alpha_K = 7,53 w_0^{0,78}$,

для шероховатой поверхности $\alpha_K = 7,94 w_0^{0,78}$.

2.1.3. 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:

$$\tau_1 = \frac{Gc}{\alpha F} 2,3 \cdot \lg \frac{t_{\Pi} - t_{\text{МН}}}{t_{\Pi} - t_{\text{МК}}}; \quad (21)$$

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha F \varphi} 2,3 \cdot \lg \frac{t_{\Pi} - t_{\text{МН}}}{t_{\Pi} - t_{\text{МК}}}, \quad (22)$$

где G — масса детали;

c — средняя удельная теплоемкость;

α — коэффициент теплоотдачи;

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

t_{Π} — температура печи;

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

φ — коэффициент замедления нагрева.

Формула (21) используется при расчете времени нагрева тонких изделий, т.е. когда критерий Био меньше 0,25:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad (23)$$

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 (22), содержащей коэффициент замедления нагрева φ . Коэффициент φ , в свою очередь, определяется по следующим формулам:

1) для пластины, нагреваемой с двух сторон

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} Bi}; \quad (24)$$

2) для цилиндра

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5} Bi}; \quad (25)$$

3) для шара

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} Bi}. \quad (26)$$

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

Формулы (21) и (22) 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

$$\tau = \frac{Gc}{c_{\text{и}} F} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^3} \left[\psi\left(\frac{T_{\text{мк}}}{T_{\text{п}}}\right) - \psi\left(\frac{T_{\text{мн}}}{T_{\text{п}}}\right) \right]. \quad (27)$$

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.

Таблица 1

Зависимость $\psi(T/T_{\pi})$ от T/T_{π}

T/T_{π}	$\psi(T/T_{\pi})$	T/T_{π}	$\psi(T/T_{\pi})$	T/T_{π}	$\psi(T/T_{\pi})$
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

2.1.4. Определение времени нагрева изделий в печах периодического действия

Нагрев тонких изделий

Время нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия зависит от начальной температуры изделия и мощности печи. График нагрева изделия приведен на рис. 3.

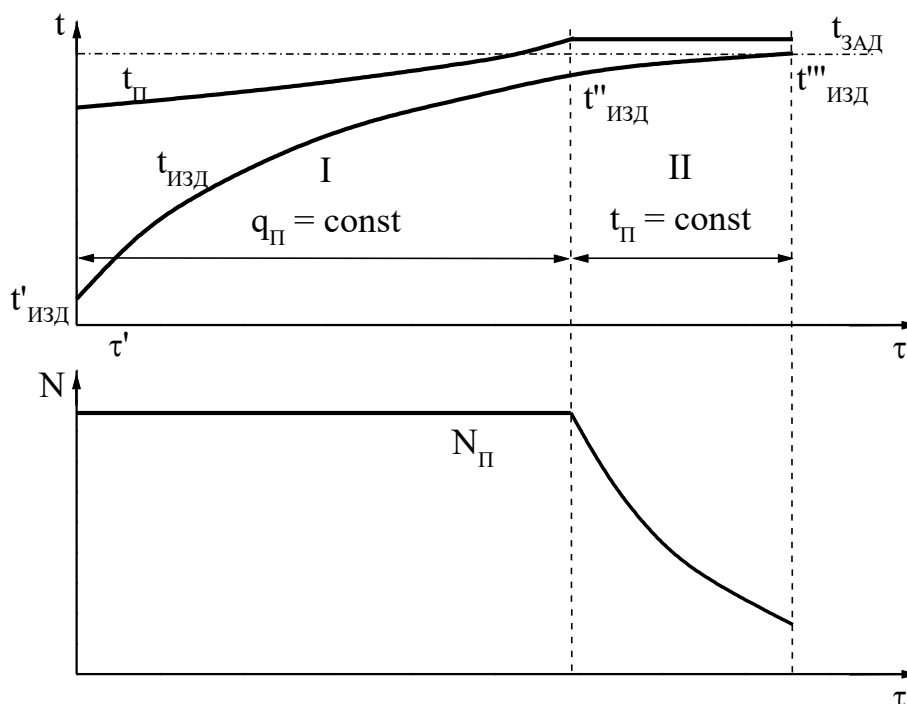


Рис. 3. График нагрева тонкого изделия в печах периодического действия

Процесс нагрева разбивают на два этапа.

Первый этап — от начала нагрева до достижения в камере печи заданной температуры нагрев изделий осуществляется при постоянном тепловом потоке. Тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделий,

$$q_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}} - P_{\text{пот}}}{F_{\text{изд}}}, \quad (28)$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность печи; $P_{\text{пот}}$ — мощность тепловых потерь печи; $F_{\text{изд}}$ — тепловоспринимающая поверхность изделий.

Для высокотемпературной печи уравнение теплопередачи примет вид

$$q = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (29)$$

Здесь $C_{\text{пр}}$ — приведённый коэффициент лучеиспускания:

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{п}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{п}}} - 1 \right)}, \quad (30)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ и $\varepsilon_{\text{изд}}$ — степень черноты печной кладки и изделия; $F_{\text{изд}}$ и $F_{\text{п}}$ — поверхность изделия и стен печной камеры; $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{изд}}$ — текущие значения температуры печи и изделия.

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. Температура тонких изделий в соответствии с формулой:

$$t''_{\text{изд}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \frac{q_{\text{п}}}{C_{\text{пр}}}} - 273. \quad (31)$$

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

$$q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1 = Gc(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) \quad (32)$$

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{Gc(t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})}{q_{\text{п}} F_{\text{изд}}}, \quad (33)$$

где G — масса изделий; c — средняя удельная теплоёмкость.

Для низкотемпературных печей уравнение теплоотдачи будет иметь вид

$$q_{\text{п}} = (\alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}})(t_{\text{п}} - t_{\text{изд}}). \quad (34)$$

Здесь $q_{\text{п}}$ — тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности изделия, — может быть определён из уравнения (8), а $\alpha_{\text{изл}}$ — коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\text{изл}} = C_{\text{пр}} \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{п}} - t_{\text{изд}}}. \quad (35)$$

Коэффициент $\alpha_{\text{конв}}$ для печей с естественной конвекцией он может быть принят равным в среднем 10–15 Вт/(м²·°С).

С учётом этого для момента времени, соответствующего достижению заданного значения $T_{\text{п}}$, будем иметь

$$q_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}''}{100} \right)^4 \right] + 10(t_{\text{п}}'' - t_{\text{изд}}''). \quad (36)$$

Длительность первого этапа τ_1 может быть определена из уравнения (13).

В течение второго этапа нагрев изделий будет осуществляться при постоянной температуре печи, и время нагрева может быть определено по формуле (21).

Нагрев массивных изделий

Как и в предыдущем случае, разбиваем процесс нагрева на два этапа: первый этап — нагрев при постоянном тепловом потоке, второй этап — нагрев при постоянной температуре печи (рис. 4).

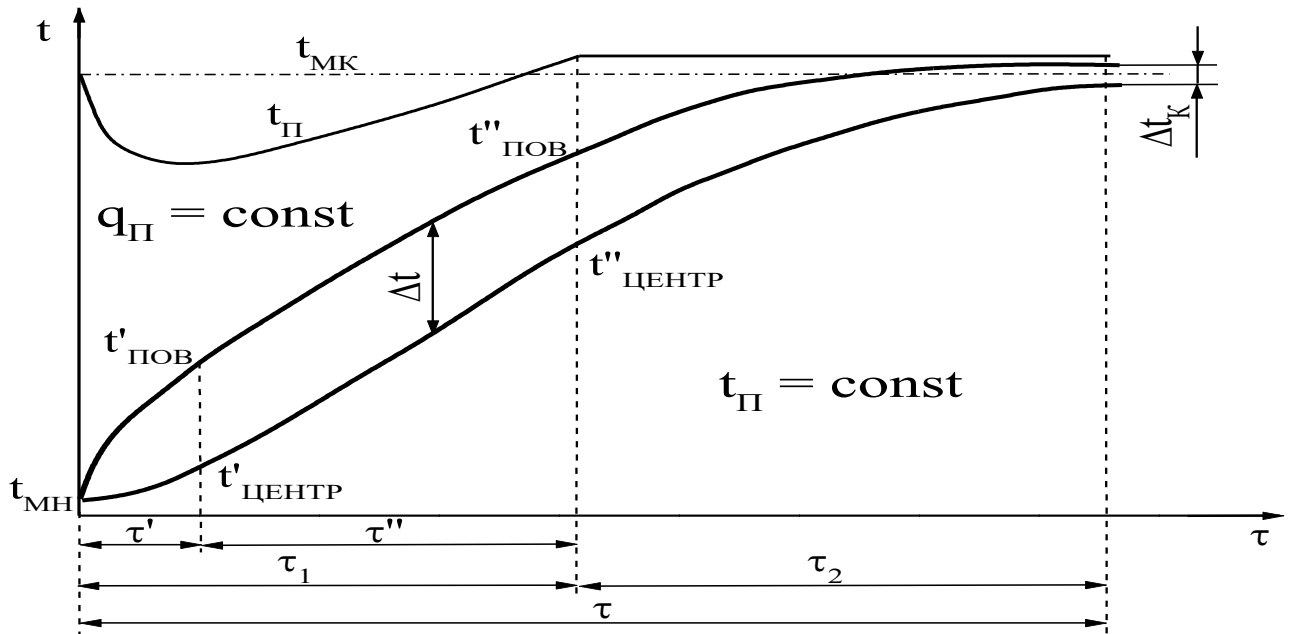


Рис. 4. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия

На первом этапе изделия будут нагреваться тепловым потоком q_{π} , который определяется по формуле (8). Время первого периода нагрева $\tau' = 0,3S^2/a$ для бесконечной пластины толщиной $2S$ и $\tau' = 0,25R^2/a$ для бесконечного цилиндра. К концу периода в изделии установится регулярный тепловой режим, характеризующийся постоянным внутренним температурным перепадом $\Delta t_1 = q_{\pi}S/2\lambda$ для пластины и $\Delta t_1 = q_{\pi}R/2\lambda$ для цилиндра.

К концу первого и к началу второго периода нагрева температура поверхности пластины достигнет $t'_{\text{пов}} = 1,27\Delta t = 1,27q_{\pi}S/2\lambda$, а температура центра $= 0,27q_{\pi}S/2\lambda$;

для цилиндра $t'_{\text{пов}} = 1,5\Delta t = 1,5q_{\pi}R/2\lambda$ и $t'_{\text{ц}} = 0,5\Delta t = 0,5q_{\pi}R/2\lambda$. В дальнейшем во время нагрева в регулярном режиме температуры поверхности и центра изделия будут увеличиваться пропорционально времени с постоянной скоростью. Время регулярного режима может быть определено по формулам: для пластины

$$\tau'' = \frac{c\rho S}{q_{\pi}}(t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}), \quad (37)$$

а для цилиндра

$$\tau'' = \frac{c\rho R}{2q_{\pi}}(t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}), \quad (38)$$

где c — средняя удельная теплоёмкость; ρ — плотность материала; S — половина толщины изделия; $t''_{\text{пов}}$ и $t'_{\text{пов}}$ — температура поверхности изделия в начале и в конце регулярного режима; R — радиус цилиндра.

Отсюда длительность первого этапа нагрева бесконечной пластины

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,3\frac{S^2}{a} + \frac{c\rho S}{q_{\pi}}(t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}), \quad (39)$$

а бесконечного цилиндра

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,25\frac{R^2}{a} + \frac{c\rho R}{2q_{\pi}}(t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}). \quad (40)$$

Температура поверхности изделия к концу первого этапа

$$t''_{\text{пов}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{T''_{\pi}}{100}\right)^4 - \frac{q_{\pi}}{C_{\text{пр}}}} - 273. \quad (41)$$

Второй этап нагрева изделия осуществляется при постоянной температуре печи. При расчёте нужно учитывать, что к моменту начала второго этапа по сечению изделия (для плиты) установится параболическое распределение температуры. При этом может быть принято среднее значение температуры в сечении изделия: для плиты

$$t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,7\Delta t, \quad (42)$$

для цилиндра

$$t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,6\Delta t. \quad (43)$$

В этом случае расчёт времени нагрева на втором этапе до заданной температуры может быть осуществлён с использованием графиков Д.В.Будрина с тем лишь изменением, что относительные температуры будут

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов}}}{t_{\text{п}} - t''_{\text{ср}}} \quad (44)$$

и

$$\theta_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{п}} - t''_{\text{ц}}}{t_{\text{п}} - t''_{\text{ср}}}. \quad (45)$$

При расчёте времени второго этапа нагрева массивных изделий в число Био подставляют средние значения коэффициента теплоотдачи α .

Расчёт времени нагрева насыпных немонолитных грузов может быть осуществлён так же, как и монолитных, с учётом их насыпной плотности и эквивалентного коэффициента теплопроводности (табл. 2).

Таблица 2

Насыпная плотность и эквивалентный
коэффициент теплопроводности λ насыпных грузов

Вид загрузки	Насыпная плотность, кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)
Стальные мелкие болты и гайки ($d = 10 \dots 12$ мм)	1650...1800	4,65
Стальные шарики ($d = 10 \dots 12$ мм)	4400	6,98...10,5
Стальные ролики ($d = 12 \dots 30$ мм)	4350	8,14...11,6
Стальные тонкие кольца	1600	17,4...19,8
Стальные детали в металлической стружке	2000	0,81
Стальная проволока в бунтах	—	2,3...3,5
Стопа листов толщиной 1 мм	—	0,47...0,58

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

2.1.5. Особенности расчёта многозонных методических печей

При наличии в методической печи нескольких зон можно, приняв погонную мощность нагревателей в пределах каждой зоны постоянной,

- 1) выдержать желательную скорость нагрева;
- 2) установить в первых зонах, где изделия ещё холодные, максимальную погонную мощность нагревателей в целях форсирования в них процесса нагрева, и в то же время обеспечить возможность выравнивания температурных перепадов в последней зоне;
- 3) обеспечить сравнительно небольшие колебания температуры нагревателей по длине печи и тем самым хорошее их использование.

Длины отдельных зон могут быть и одинаковыми, и различными. В основном они выбираются исходя из конструктивных соображений; желательно лишь, чтобы они были не очень велики (1,5...2,5 м для горизонтальной печи и 1...1,5 м для вертикальной) и не очень отличались друг от друга.

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

$$L = \frac{E\tau}{g}, \quad (46)$$

где E — заданная производительность печи; g — погонная нагрузка.

Если длина печи определена, то её можно разбить на зоны. По кривой нагрева для начала и конца каждой зоны определяют температуры изделий, а по ним — удельные тепловые потоки зон: для плиты

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho S}{q_{\text{п}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}), \quad (47)$$

а для цилиндра

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho R}{2q_{\text{п}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}). \quad (48)$$

Здесь $q_{\text{п}}$ — постоянный тепловой поток зоны; $t_{\text{кон.пов.изд}}$ и $t_{\text{нач.пов.изд}}$ — температуры изделий в конце и в начале зоны.

Выражения (47) и (48) действительны для всех зон, кроме первой; для неё должно быть учтено время начального периода нагрева τ_1 .

Полученные значения $q_{\text{п}}$ должны быть проверены с точки зрения допустимых температур печи:

$$q_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (49)$$

где $T_{\text{п}}$ — максимально допустимая с точки зрения стойкости нагревателей температура печи; $T_{\text{изд}}'''$ — температура поверхности изделий в конце данной зоны.

При предварительных расчётах температура печи может приниматься меньшей на 50°C значений температур, рекомендуемых для нагревателей.

Когда кривая нагрева не задана, строим её исходя из возможного приближения к оптимальной кривой, соответствующей нагреву при $t_{\text{п}} = \text{const}$. Для этой цели, задаваясь длиной зон $1,5 \dots 2,5$ м и определяя соответствующее время пребывания изделий в каждой зоне, находим удельный тепловой поток для последней зоны, температура изделий в которой известна (конечная).

Из выражений

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho S}{q_{\text{п}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}) \quad (50)$$

и

$$\tau_{\text{зоны}} = \frac{c\rho R}{2q_{\text{п}}} (t_{\text{кон.пов.изд}} - t_{\text{нач.пов.изд}}) \quad (51)$$

можно определить температуру поверхности изделий в начале последней зоны или, что то же самое, в конце предыдущей зоны, что позволит найти удельный тепловой поток этой зоны. Действуя таким образом, получаем температуры изделий в каждой зоне и, дойдя до начальной температуры их нагрева, строим кривую нагрева изделий. Если число зон получится дробным, то надо скорректировать их длины в ту или иную сторону, а затем повторить расчёт, начиная с последней зоны, и получить температуры изделий в начале и конце каждой зоны и удельные тепловые потоки. Зная время пребывания в зоне τ и её длину, можно по соотношению $L = E\tau/g$ уточнить производительность печи или загрузку на 1 м длины печи.

В тех случаях, когда задана максимально допустимая скорость нагрева изделий ν ($^{\circ}\text{C}/\text{ч}$), максимальный удельный тепловой поток не должен превосходить: для пластины

$$q_{\text{п}} = \nu c\rho S, \quad (52)$$

а для цилиндра

$$q_{\text{п}} = 6,5\nu c\rho R. \quad (53)$$

Обычно $\nu_{\text{макс}}$ задаётся для первой зоны.

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

$$q_{\text{п}} = 2\lambda \frac{\Delta t}{S} \quad (54)$$

для пластины и

$$q_{\text{п}} = 2\lambda \frac{\Delta t}{R} \quad (55)$$

для цилиндра.

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

3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ПЕЧИ

3.1. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Тепловой расчёт печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. При проектировании печи тепловой баланс необходим для определения расхода топлива и выбора топливосжигающих устройств для топливных печей или мощности нагревательных устройств и расчёта нагревателей для электрических печей.

Для термических печей наиболее распространён тепловой расчёт, отнесённый к единице времени работы печи.

Ввиду того, что в тепловом расчёте топливных печей статей прихода и расхода больше, чем в расчёте электрических печей, рассмотрим тепловой расчёт топливной печи.

3.1.1. Приходные статьи

1. Тепло от горения топлива

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} B, \quad (56)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплотворность топлива; B — часовой расход топлива.

2. Физическое тепло топлива

$$Q_{\text{фт}} = B c_{\text{т}} t_{\text{т}}. \quad (57)$$

Здесь $c_{\text{т}}$ — средняя теплоёмкость топлива; $t_{\text{т}}$ — температура подаваемого в печь топлива.

3. Физическое тепло подогреваемого воздуха

$$Q_{\text{фв}} = \alpha L_0 B c_{\text{в}} t_{\text{в}}, \quad (58)$$

где α — коэффициент избытка воздуха (1,05...1,17); L_0 — теоретически необходимое количество воздуха на единицу топлива; $c_{\text{в}}$ — средняя теплоёмкость воздуха; $t_{\text{в}}$ — температура подаваемого в печь воздуха.

4. Физическое тепло нагреваемого металла

$$Q_{\text{фм}} = P c_{\text{м}} t_{\text{м}}. \quad (59)$$

Здесь P — производительность печи; c_m — средняя теплоёмкость металла; t_m — температура загружаемого в печь металла.

5. *Тепло экзотермических реакций* (к ним относятся реакции окисления металла)

$$Q_{\text{экз}} = \frac{\sum qm}{\tau}, \quad (60)$$

где q — удельная теплота экзотермической реакции; m — масса прореагировавшего вещества; τ — время реакции.

Таким образом, если нагревается холодный, не подогретый металл, а топливо и воздух тоже не греют, то приход тепла выражается только в тепле от горения топлива (первая статья).

3.1.2. Расходные статьи

1. *Тепло на нагрев металла*

$$Q_m = PC_{\text{ср}}(t_{\text{мк}} - t_{\text{мн}}). \quad (61)$$

Здесь P — производительность печи; $C_{\text{ср}}$ — средняя теплоемкость металла в интервале температур от $t_{\text{мн}}$ до $t_{\text{мк}}$; $t_{\text{мк}}$ — температура выгружаемого из печи металла; $t_{\text{мн}}$ — температура загружаемого в печь металла.

Для печей периодического действия

$$Q_m = \frac{G}{\tau_n} C_{\text{ср}}(t_{\text{мк}} - t_{\text{мн}}), \quad (62)$$

где G — масса изделий, а τ_n — время нагрева изделий в печи.

2. *Потери тепла на нагрев приспособлений*

$$Q_{\text{пр}} = q_{\text{пр}} C_{\text{ср.пр}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}). \quad (63)$$

Здесь $q_{\text{пр}}$ — масса приспособлений, нагреваемая в единицу времени; $C_{\text{ср.пр}}$ — средняя теплоемкость металла приспособления в интервале температур от $t_{\text{н}}$ до $t_{\text{к}}$; $t_{\text{н}}$ — температура загружаемого в печь приспособления; $t_{\text{к}}$ — температура выгружаемого из печи приспособления.

3. *Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки.* При стационарном теплообмене потери тепла через многослойную кладку определяются по формуле

$$Q_{\text{кл}} = \frac{t_{\text{п}} - t_0}{\frac{S_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 F_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n F_n} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}} F_{\text{нар}}}}, \quad (64)$$

в которой $t_{\text{п}}$ — температура рабочего пространства печи; t_0 — температура воздуха в цехе; S_1, S_2, S_3 — толщины отдельных слоёв кладки; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности слоёв; F_1, F_2, \dots, F_n — средние площади слоёв кладки; $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент теплопередачи от наружной

поверхности кладки в окружающую среду; $F_{\text{нар}}$ — площадь наружной поверхности кладки.

Для определения F_1, F_2, \dots, F_n и $F_{\text{нар}}$ необходимо иметь эскиз футеровки печи, пользуясь которым рассчитывают размеры каждого слоя, причём упрощенно они могут быть найдены по диагональным стыкам. Зная эти размеры, можно оценить внутреннюю $F_{\text{вн}}$ и наружную $F_{\text{нар}}$ площади кладки, а также площади между отдельными слоями $F_{12}, F_{23},$

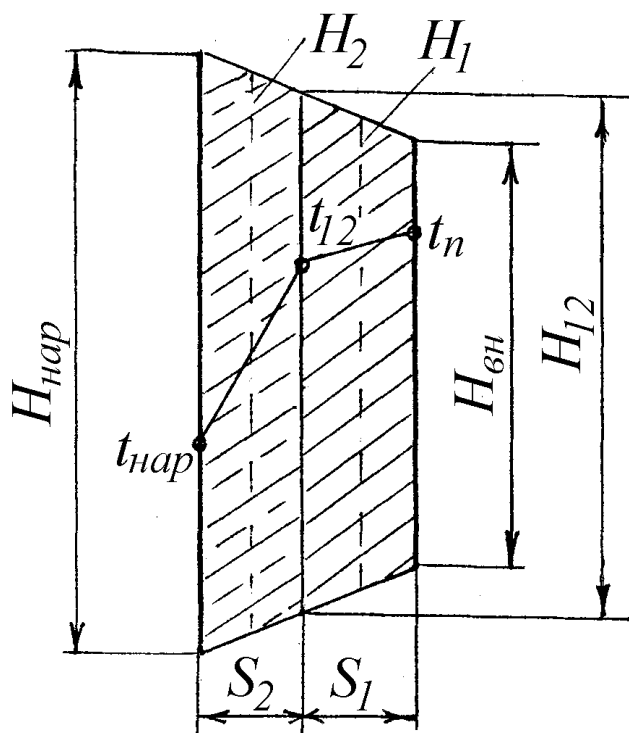


Рис.5. Эскиз к расчёту потерь тепла теплопроводностью через стенку печи

... Далее рассчитывают средние площади отдельных слоёв:

$$F_1 = \sqrt{F_{\text{нар}} \cdot F_{12}}; F_2 = \sqrt{F_{12} \cdot F_{23}}, \text{ и т.д.} \quad (65)$$

Коэффициент теплопередачи от наружной поверхности кладки к окружающей среде $\alpha_{\text{в}}$ принимают обычно равным 18 Вт/(м² К) для пламенных печей и 12 Вт/(м² К) для электрических. Меньшие значения $\alpha_{\text{в}}$ для электрических печей обусловлены тем, что эти печи имеют большую теплоизоляцию и, следовательно, меньшую температуру внешней поверхности кладки.

Коэффициенты теплопроводности огнеупорных теплоизоляционных материалов обычно рассчитывают по формуле

$$\lambda = a + b \cdot t_{\text{ср}}, \quad (66)$$

где a и b — постоянные, характеризующие материал; $t_{\text{ср}}$ — средняя температура слоя.

Если принять температуру внутренней поверхности футеровки равной температуре печи $t_{\text{п}}$ и обозначить температуры между отдельными слоями через t_{12} , t_{23} и т.д., а температуру наружной поверхности кладки через $t_{\text{нар}}$, то средние температуры первого, второго и других слоёв

$$t_1 = \frac{t_{12} - t_{\text{нар}}}{2}; t_2 = \frac{t_{23} - t_{12}}{2}; \dots; t_n = \frac{t_n - t_{n-1}}{2}. \quad (67)$$

Для того, чтобы правильно определить коэффициенты теплопроводности отдельных слоёв, необходимо знать t . Расчёт теплопотерь через кладку производят методом приближения. Сначала задаются какими-либо значениями t , затем определяют теплопотери через кладку $Q_{\text{кл}}$. После этого уточняют полученные значения.

Тепловые потери через кладку

$$Q_{\text{кл}} = \frac{t_n - t_0}{R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{нар}}}. \quad (68)$$

Здесь R_1, R_2, \dots, R_n — тепловые сопротивления слоёв кладки; $R_{\text{нар}}$ — сопротивление передаче тепла от поверхности кладки окружающей среде.

Тепловой поток, проходящий через стенку, постоянен, поэтому

$$Q_{\text{кл}} = \frac{t_n - t_{n,n-1}}{R_n}; Q_{\text{кл}} = \frac{t_{12} - t_{\text{нар}}}{R_1}. \quad (69)$$

и т.д., откуда

$$t_{\text{нар}} = t_{12} - Q_{\text{кл}} R_1 = t_n - Q_{\text{кл}} (R_1 + R_2 + \dots + R_n). \quad (70)$$

Если полученные в результате проверки температуры будут отличаться от выбранных не более чем на 10°C , то расчёт произведён правильно. Если разница превышает эту величину, то задаются $t_{\text{нар}}$, t_{12} , ..., $t_{n,n-1}$, близкими к полученным при проверке, и снова производят расчёт и проверку до тех пор, пока проверка не даст хорошего совпадения.

Расчёт потерь тепла через многослойную кладку может быть выполнен с применением компьютера.

4. Потери тепла излучением в открытые окна и дверцы

$$Q_{\text{луч}} = 5,7\varepsilon F \varphi \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \Delta\tau, \quad (71)$$

где ε — степень черноты излучаемого тела (стенки печи, печные газы, нагретый металл);

F — площадь отверстия;

φ — коэффициент диаграммирования;

$T_{\text{п}}$ — абсолютная температура излучающего тела;

$T_{\text{в}}$ — абсолютная температура воздуха в цехе;

$\Delta\tau = \frac{\tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{общ}}}$ — относительное время, в течение которого дверца бывает открытой;

$\tau_{\text{откр}}$ — суммарное время, когда дверца бывает открытой во время работы печи;

$\tau_{\text{общ}}$ — общее время работы печи.

5. *Потери тепла, обусловленные «тепловыми короткими замыканиями»*

Для термических печей многих типов потери тепла вследствие нарушения сплошности кладки (термопарными трубками, выводами нагревателей, направляющими и осями роликов и т.п.) рекомендуется оценивать величиной, равной 50% от потерь тепла стенками.

$$Q_{\text{ткз}} = (0,1 \dots 0,5) Q_{\text{ст}}. \quad (72)$$

6. *Потеря тепла с отходящими дымовыми газами*

$$Q_{\text{дым}} = BV_{\text{пг}} i_{\text{пг}}, \quad (73)$$

где $V_{\text{пг}}$ — объем продуктов горения, получаемый при сгорании единицы топлива;

$i_{\text{пг}}$ — теплосодержание продуктов горения.

Для предварительных оценок рекомендуется принимать следующие температуры продуктов сгорания, покидающих печь:

а) методические печи при холодном посаде углеродистой стали — $t_{\text{пг}} = 800 \dots 1000^\circ\text{C}$, в среднем $t_{\text{пг}} = 900^\circ\text{C}$;

б) полуметодические печи с поштучной загрузкой и выгрузкой изделий $t_{\text{пг}} = 1050 \dots 1100^\circ\text{C}$;

в) камерные печи с поштучной загрузкой и выгрузкой изделий — $t_{\text{пг}} = t_{\text{мк}} + (50 \dots 100)^\circ\text{C}$.

7. *Потери тепла с охлаждающей водой*

$$Q_{\text{вод}} = D_{\text{в}} C_{\text{в}} (t_{\text{н}} - t_{\text{х}}), \quad (74)$$

где $D_{\text{в}}$ — часовой расход воды;

$C_{\text{в}}$ — теплоемкость воды;

$t_{\text{н}}$ — температура нагретой воды ($t_{\text{н}} = 45 \dots 50^\circ\text{C}$);

$t_{\text{х}}$ — температура холодной воды ($t_{\text{х}} = 15 \dots 20^\circ\text{C}$).

8. *Потери тепла на аккумуляцию в слое кладки*

$$Q_{\text{акк.сл}} = V_{\text{сл}} \rho_{\text{сл}} C_{\text{сл}} (t_{\text{ср.сл}} - t_{\text{в}}); \quad (75)$$

$$Q_{\text{акк.п}} = \frac{\sum Q_{\text{акк.сл}}}{\tau_{\text{ц}}}. \quad (76)$$

Здесь $V_{\text{сл}}$ — объем слоя кладки;

$\rho_{\text{сл}}$ — плотность слоя кладки;

$C_{\text{сл}}$ — средняя теплоемкость слоя кладки;

$t_{\text{ср.сл}}$ — средняя температура в конце нагрева слоя кладки;

$t_{\text{в}}$ — температура воздуха в цехе;

$\tau_{\text{ц}}$ — время цикла, то есть время непрерывной работы печи.

Для печей с большим циклом работы эта статья носит условный характер и существенного значения не имеет.

9. Затраты тепла на нагрев контролируемой атмосферы

$$Q_{\text{ат}} = q_{\text{ат}} C_{\text{ср}} (t_{\text{к}} - t_0), \quad (77)$$

где $q_{\text{ат}}$ — средний расход атмосферы [10];

$C_{\text{ср}}$ — средняя теплоемкость атмосферы в интервале температур $t_{\text{к}} \dots t_0$;

$t_0, t_{\text{к}}$ — начальная и конечная температуры атмосферы.

Прочие потери тепла составляют 3...5% от $Q_{\text{расх.}}$. Для электрических печей не рассчитывают $Q_{\text{дым}}$, $Q_{\text{выб.}}$, а для пламенных $Q_{\text{подс.}}$.

Приходная статья для электрических печей одна — тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через нагреватели.

Результаты расчетов всех расходных и приходных статей сводят в таблицу (табл. 3).

Таблица 3 – Тепловой баланс печи

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
1. Тепло, полученное при сжигании топлива 2. Тепло, вносимое подогретым воздухом 3.....			1. Полезное тепло на нагрев металла 2. Тепло, расходуемое на нагрев приспособлений 3. Тепло. теряемое теплопроводность ю через кладку печи 4.....		
Итого		100	Итого		100

Расход тепла определяют из уравнения теплового баланса. Полученное значение увеличивают на 10...20% (с учетом форсирования нагрева и возможности работы печи на худших сортах топлива) для печей непрерывного действия и на 20...100% для печей периодического действия. Таким образом,

$$B_{\text{макс}} = (1,1 \dots 1,2) B. \quad (78)$$

Для электрических печей установочную мощность определяют из расчетной:

$$N_{\text{уст}} = (1,25 \dots 1,15) N_{\text{расч}} \quad (79)$$

Коэффициент полезного действия для термических печей определяется по формуле

$$\eta = \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{расх}}} \cdot 100\% \quad (80)$$

где $Q_{\text{м}}$ — тепло, идущее на нагрев металла;

$Q_{\text{расх}}$ — суммарные затраты тепла печью выбранной конструкции.

Обычно КПД топливных печей 10...40%, а электрических 50...80%, так как в последних нет потерь тепла с отходящими газами. Электрические печи (ванны) имеют КПД 30...40%, потому что много тепла излучается зеркалом ванны.

3.2. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — 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;

N — мощность тепловая, электрическая, Вт (при индукционном нагреве P);

n — количество;

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 стоградусной шкале (Цельсия), °С;
 U — напряжение, В;
 W — удельная поверхностная нагрузка нагревателя, Вт/см²;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 β — температурный коэффициент физической величины, К⁻¹;
 γ — плотность, кг/м³;
 δ — активная глубина проникновения тока, мм;
 ε — степень черноты поверхности материала;
 η — коэффициент полезного действия;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ρ — удельное электросопротивление, мкОм·м;
 Σ — сумма, суммарное;
 σ — напряжение, Па;
 τ — время, с;
 Φ — коэффициент диафрагмирования;
 ω — степень развития кладки;

3.2.1. Классификация, материалы и конструкции нагревателей

Целью электрического расчета печей сопротивления является выбор материала нагревателей и определение их геометрических размеров при известных размерах рабочего пространства, температуре и мощности печи.

Нагревательные элементы являются одной из важнейших частей всякой электрической печи сопротивления, и от их надёжности в значительной степени зависит надёжность её работы. Работа нагревателей происходит обычно в очень тяжёлых условиях, часто при предельно допустимых для материала, из которого они выполнены, температурах. Поэтому долговечность нагревателей значительно ниже срока службы других элементов печей (кроме жароупорных деталей, находящихся в зоне высоких температур).

Срок службы нагревателей зависит от целого ряда факторов: рабочей температуры, характера её изменения во времени, конструкции и размеров нагревателя, воздействия на него атмосферы печи. При расчёте нагревательных элементов электрических печей сопротивления конструктор должен выбрать тип нагревателей и материал для их изготовления, определить их размеры — сечение и длину — и разместить их внутри печи. Для решения этих задач имеются исходные из следующих предпосылок.

1. Вся забираемая электрической печью мощность выделяется в её нагревательных элементах в виде тепла и при установившемся тепловом

режиме (так как нагреватели обладают, как правило, малой тепловой инерцией, в них весьма быстро устанавливается стационарный режим) должна быть передана нагреваемым изделиям и кладке печи. Уравнения теплопередачи между нагревателями, нагреваемыми изделиями и футеровкой печи дают связь между их температурами, мощностью печи и размерами нагревательного элемента.

2. Мощность, выделяемая в нагревательных элементах, должна быть равна расчётной мощности печи и, следовательно, сопротивление элементов должно соответствовать этой мощности и напряжению питания.

3. Нагреватели должны быть размещены внутри рабочего пространства печи. Это требование также накладывает известные условия на размеры (особенно длину) и конструкцию нагревательных элементов.

Кроме того, должны быть, естественно, известны физические свойства и максимально допустимые температуры эксплуатации материалов, применяемых для нагревательных элементов.

Электрические печи сопротивления относятся к группе нагревательных устройств косвенного нагрева, в которых тепло, выделяемое электрическими нагревательными элементами, передается нагреваемым изделиям тремя способами: излучением, конвекцией и теплопроводностью. Доля каждого способа определяется температурой печи, ее конструкцией, то есть наличием циркуляционных вентиляторов или мешалок, типом и расположением в печи самих нагревателей. Например, нагрев в вакуумных печах идет только путем лучистого способа передачи тепла, а в печах-ваннах и в печах с кипящим слоем — всеми тремя способами. В печах с газовой средой при температурах выше 600...700°C преобладает излучение, а ниже — конвекция, доля которой увеличивается при наличии в печи циркуляционных вентиляторов.

С учетом способа передачи тепла и расположения в печи нагреватели электрических печей сопротивления можно разделить на три группы.

Первая группа — нагреватели с теплоотдачей преимущественно излучением или *свободно-излучающие нагреватели*. Они используются в печах с газовой средой и рабочей температурой 600...700°C и выше без принудительной циркуляции атмосферы, в вакуумных печах во всем интервале температур и в печах-ваннах с наружным обогревом тигля. Нагреватели располагаются, как правило, на внутренних поверхностях рабочего пространства печи. Материал нагревателей — высокоомические сплавы и стали, карборунд, дисилицид молибдена и графит.

Вторая группа — нагревательные элементы печей с преимущественной конвективной теплоотдачей (*конвективные нагреватели*). Они обычно применяются в низко- и среднетемпературных печах (до 600...700°C) с воздушной или контролируемой атмосферой, а также в печах-ваннах до 600°C.

В этом случае расположенные в рабочем пространстве нагреватели всегда отделены от нагреваемых изделий экранами, являющимися элементами системы принудительной циркуляции печной среды. Часто в газоздушных печах нагреватели вообще выносятся из рабочего пространства в виде отдельного калорифера, обогревающего либо всю печь, либо ее отдельную зону. Во всех случаях в печи имеется один или несколько мощных циркуляционных вентиляторов, направляющих воздушный или газовый поток по замкнутой схеме: вентилятор — нагреватели (калорифер) — нагреваемая садка — вентилятор. Конвективные нагреватели изготавливаются только из металлических материалов.

Третья группа — нагревательные элементы с теплоотдачей теплопроводностью (*закрытые нагреватели*). Обычно такие нагреватели замурованы в огнеупорный слой кладки печи или заключены в металлическую трубку, заполненную песком-электроизолятором (кварц, периклаз). Последние получили название ТЭН (трубчатый электрический нагреватель). Нагреватели закрытого типа применяются чаще всего в лабораторных печах, а ТЭНы — в печах-ваннах и в бытовых электронагревательных приборах.

Закрытые нагреватели изготавливаются только из металлических материалов. Тепло от нагревателя закрытого типа передается только теплопроводностью через слой огнеупора или изолятора, а уже с поверхности металлической трубки или внутренней стенки печи — излучением и конвекцией (или только одним из способов) в рабочее пространство печи.

Для изготовления нагревателей применяются различные материалы: металлические сплавы, высоколегированные стали и чистые тугоплавкие металлы, графит в различных формах, оксиды углерода и молибдена.

Металлические материалы — это сплавы и стали с высоким омическим сопротивлением. К ним предъявляются следующие требования:

- 1) высокое омическое сопротивление и низкая его зависимость от температуры;
- 2) высокая жаростойкость и удовлетворительное сопротивление ползучести;
- 3) хорошая пластичность в состоянии поставки и после определенного срока эксплуатации;
- 4) близкие значения коэффициентов линейного расширения самого сплава и окисной пленки, образующейся на нем;
- 5) хорошая свариваемость и пластичность для удобства изготовления и гибки нагревателя;
- 6) низкая стоимость.

Нагреватели промышленных и лабораторных печей изготавливают из следующих материалов.

1. Нихромы: X20H80 (X20H80T, X20H80-H), X15H60 (X15H60T, X15H60-H). Температура их эксплуатации — до 1000...1200 °С в зависимости от марки. На базе нихромов разработаны сплавы с добавкой алюминия — ХН70Ю, ХН60ЮЗ. Все нихромы — очень дорогие материалы из-за высокого содержания никеля (60...85%) и хрома (до 20%). Преимущества нихромов — хорошая пластичность (даже после определенного времени эксплуатации) и высокая окалинотойкость, которая определяется следующими факторами:

- плотная окисная пленка на базе оксида Cr_2O_3 , покрывающая всю поверхность сплава при первоначальном нагреве, имеет очень низкий коэффициент диффузии кислорода через нее;

- скорость роста окисной пленки (по толщине) составляет 0,05...0,32 мм/год при условии, что эта пленка механически не разрушается на поверхности металла;

- коэффициент линейного расширения нихрома и его окисной пленки практически одинаков, поэтому при многократных изменениях температуры пленка не отслаивается с поверхности сплава.

2. Железохромоалюминиевые сплавы: X13Ю4, X15Ю5 (фехрали) и X23Ю5, X23Ю5Т, X27Ю5А (хромали). Температура их эксплуатации — до 800...950 °С для фехралей и до 1200...1400 °С для хромалей. Стойкость этих сплавов в два-три раза ниже, чем у нихрома. Они имеют низкую начальную пластичность и сильнее охрупчиваются в процессе эксплуатации. Гибку проволоки сечением более 4 мм и ленты более 2 мм необходимо проводить с предварительным подогревом, так как они имеют очень низкую пластичность при комнатной температуре. Основные достоинства этих сплавов — значительно более низкая стоимость по сравнению с нихромами и более высокие предельные температуры у хромалей. Конструктивно металлические нагреватели любого типа выполняют из круглой проволоки в форме зигзага или спирали и из плоской ленты в виде зигзага. На рис. бприведены размерные параметры нагревателей:

L — длина нагревателя в готовом (свернутом) виде, м;

$d_{\text{в}}$ — диаметр вывода, мм;

t — шаг спирали, мм;

e — шаг полузигзага, мм;

D — диаметр спирали, $D=(4...9) \cdot d$, мм;

H — высота зигзага, мм;

d — диаметр проволоки, мм;

a, b — толщина и ширина ленты, мм.

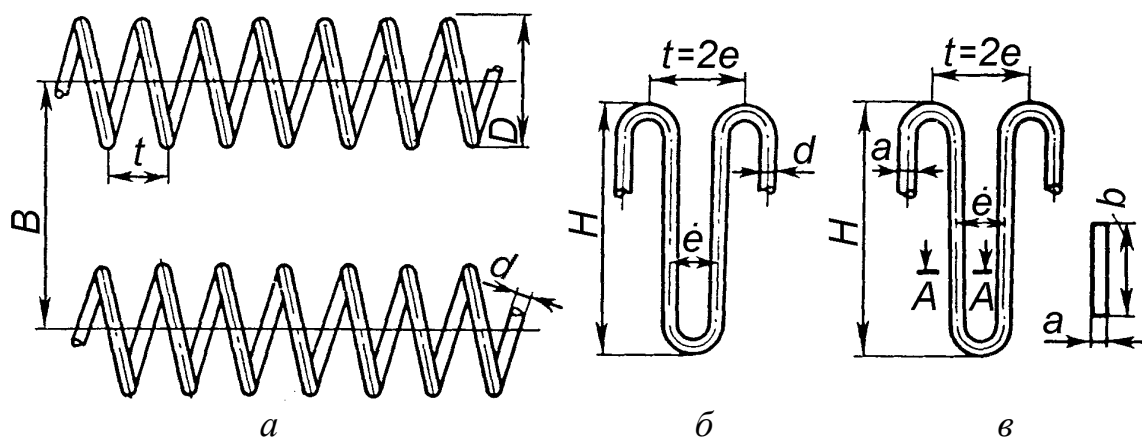


Рис. 6. Типы конструкций металлических нагревателей: *a* — проволочная спираль (п.с.); *б* — проволочный зигзаг (п.з.); *в* — ленточный зигзаг (л.з.)

Сечение проволоки и ленты гостировано. В промышленных печах применяют проволоку $d > 4$ мм, ленту — $b = 1,0 \dots 3,2$ мм с $m = b/a = 5 \dots 20$ (чаще $m = 10$); в лабораторных печах — только проволоку $d = 1 \dots 5$ мм. Величина L показывает суммарную длину всех секций одного нагревателя, которая связана с расчетной величиной l через шаг спирали t или шаг полузигзага e , а также через диаметр спирали d или высоту зигзага H .

3. В вакуумных печах, кроме нихрома, часто используют молибден и вольфрам. Их применяют из-за высокой температуры плавления — 2200°C для Mo и 2500°C для W . Металлические нагреватели выполняют в виде стержней или сплошного листа, охватывающего нагреваемую садку. В вакуумных печах применяются также два типа графитовых нагревателей: стержневые и типа ткани. Графит можно использовать в печах с науглероживающей атмосферой или с нейтральной азотной атмосферой.

4. В газонаполненных печах с температурой $1200 \dots 1600^\circ\text{C}$ применяют неметаллические материалы: карборунд (SiC) и дисилицид молибдена (MoSi_2). Карборунд может работать как в окислительной, так и в восстановительной атмосферах. Его предельная рабочая температура 1450°C . Дисилицид молибдена имеет предельную температуру 1600°C . Карборундовые и дисилицидомолибденовые нагреватели изготавливаются обычно в форме одно- и двухходовых стержней (прямой нагреватель и U-образный).

3.2.2. Расчет нагревателей

В основе всех расчетных методик, независимо от принадлежности нагревателей к первой, второй или третьей группе, лежит определение удельной поверхностной нагрузки нагревателя W . Так как из практических

соображений сечение материала нагревателя выражается в миллиметрах, а его длина — в метрах, то для приведения к удобной размерности в системе СИ удельную поверхностную нагрузку принято выражать в ваттах на квадратный сантиметр реальной поверхности нагревателя (Вт/см^2 или кВт/м^2). Она зависит от температуры нагрева изделия, способа передачи тепла, конструкции, материала и температуры нагревателя и ряда других факторов.

Во всех случаях для расчета нагревателей необходимо иметь следующие исходные данные:

N_{Σ} — установленную мощность всей печи или каждой ее зоны в кВт, которая определяется в результате расчета теплового баланса с учетом коэффициента запаса мощности $k_{\text{зап}} = 1,2 \dots 1,6$. Чем больше мощность и размеры печи (зоны), тем меньше берется коэффициент $k_{\text{зап}}$;

U — напряжение питающей сети, В. Для начала расчета принимается промышленное напряжение (380 или 220 В). В процессе расчета оно уточняется и при необходимости в схему включается понижающий, реже — повышающий трансформатор.

t_M — температура нагрева металла, $^{\circ}\text{C}$. В зависимости от нее и с учетом способа передачи выбирается материал нагревателя и его максимальная рабочая температура:

$$t_H = t_M + (50 \dots 200) ^{\circ}\text{C} ; \quad (81)$$

ρ_t — удельное электросопротивление материала, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ ($\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$). Оно выбирается в зависимости от принятой t_H .

Затем рассчитывается удельная поверхностная нагрузка W , определяется сечение и длина нагревателя. Под «нагревателем» в данном случае понимается произвольное количество последовательно включенных секций одинаковой конструкции, формы, сечения и выполненных из одного материала.

Часто приходится сначала выбрать число нагревателей, и тогда в расчет вводится N_1 — мощность одного нагревателя: $N_1 = N_{\Sigma}/n$, где n — число нагревателей.

В лабораторных и небольших полупромышленных печах число нагревателей может быть 1, 2 или 3. Для промышленных печей число нагревателей кратно 3, так как они включены на трехфазный ток.

Расчетные методики нагревателей первой, второй и третьей групп различаются способом вычисления W в зависимости от типа передачи тепла от нагревателя к изделию, конструкции и материала нагревателя и ряда других факторов.

Расчет свободно - излучающих нагревателей

Исходные данные для расчета:

N_{Σ} — установленная мощность печи (зоны), кВт;

U — напряжение, В;

ρ_t — удельное электросопротивление материала нагревателя, мкОм·м;

$F_{\text{ми}}F_{\text{ст}}$ — соответственно активная тепловоспринимающая поверхность садки металла и теплоизлучающая поверхность стенок рабочей камеры печи (зоны), на которых размещены нагреватели, м²;

$\varepsilon_{\text{м}}$ и $\varepsilon_{\text{н}}$ — соответственно степень черноты нагреваемого металла и самих нагревателей ($\varepsilon_{\text{н}}$ практически всегда равна 0,8, $\varepsilon_{\text{м}}$ при нагреве в воздушной и другой окислительной атмосфере принимается также 0,8, а в защитной — выбирается, например, по [2]);

$t_{\text{митн}}$ — соответственно конечная температура металла и нагревателей, °С; последняя определяется по формуле (81);

n — число нагревателей в печи (зоне); обычно принимают его кратным 3, тогда $N_1 = N_{\Sigma}/n$ — мощность одного нагревателя, кВт. Мощность, приходящаяся на один нагреватель не должна превышать 15...20 кВт. Если мощность, приходящаяся на одну фазу, будет больше этого значения, осуществляют включение нагревателей в несколько параллельных цепей.

При расчёте подбирают материал нагревателя и определяют:

— допустимую действительную удельную поверхностную нагрузку нагревателя $W_{\text{д}}$, Вт/см²;

— сечение нагревателя (диаметр проволоки d , мм или сечение ленты $a \times b$, мм², для ленты обычно принимают $m = b/a = 10$);

— длину нагревателя l , м;

— длину нагревателя в свернутом виде L , м.

Нагреватели могут располагаться на боковых продольных стенках, своде и на поду, и поэтому в расчетах используют расчетные размеры всей камеры печи или ее зоны: $L_{\text{р}}$, $H_{\text{р}}$, $V_{\text{р}}$.

Срок службы нагревателя, зависящий от условий окисления его поверхности, определяет допустимая удельная поверхностная нагрузка — мощность, выделяющаяся с единицы поверхности нагревателя. Для ее нахождения вводится понятие идеального нагревателя. Под идеальным подразумевают нагреватель, который образует с изделием две сплошные параллельные плоскости при условии, что все выделяемое нагревателем тепло поглощается металлом, а тепловые потери этой системы равны нулю.

В реальном случае поверхность теплоотдачи нагревателя, равная его произведению периметра на его развернутую длину, то есть длину

проволоки или ленты, из которой он изготовлен, будет отличаться от теплоизлучающей поверхности стенок печи, на которых размещены нагреватели.

При определении удельной поверхностной мощности под температурой нагревателя подразумевают его максимальную рабочую температуру, определяющую срок службы нагревателя из условий окисления: в печах периодического действия — максимальную температуру нагревателя в период выдержки, в печах непрерывного действия — температуру в конце каждой зоны.

В идеальном случае допустимая удельная поверхностная нагрузка определяется по графику (рис. 7) или по формуле

$$W_{\text{ид}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{Н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4}, \text{ Вт/см}^2, \quad (82)$$

где $C_{\text{пр}} = \frac{5,67}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{М}}} + \frac{F_{\text{М}}}{F_{\text{СТ}}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{Н}}} - 1 \right)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{Н}}$ и $\varepsilon_{\text{М}}$ — степени черноты

нагревателя и нагреваемого металла соответственно; $F_{\text{СТ}}$ — поверхность стенок печи, на которых размещены нагреватели. Для $\varepsilon_{\text{Н}} = \varepsilon_{\text{М}} = 0,8$ и $F_{\text{М}}/F_{\text{СТ}} \geq 0,8$ принимают $C_{\text{пр}} = 3,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Связь реально допустимой удельной поверхностной мощности $W_{\text{д}}$ с идеальной $W_{\text{ид}}$ выражается зависимостью:

$$W_{\text{д}} = W_{\text{ид}} \cdot \alpha_{\text{эф}} \cdot \alpha_{\text{Г}} \cdot \alpha_{\text{С}} \cdot \alpha_{\text{Р}} \cdot \alpha_{\text{РОЛ}} = W_{\text{ид}} \cdot \alpha_{\Sigma}, \quad (83)$$

где $\alpha_{\text{эф}}, \alpha_{\text{Г}}, \alpha_{\text{С}}, \alpha_{\text{Р}}, \alpha_{\text{РОЛ}}$ — поправочные коэффициенты.

$\alpha_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности излучения, который экспериментально определен [3] для нагревателей различной конструкции при минимальном допустимом относительном межвитковом расстоянии. Относительным межвитковым расстоянием называют отношение расстояния e между осями ветвей к диаметру d проволоки для проволочного зигзага — e/d , или к ширине b ленты для ленточного зигзага — e/b , или шага t между витками проволочной спирали к диаметру d проволоки — t/d . Значения $\alpha_{\text{эф}}$ приведены в табл.4.

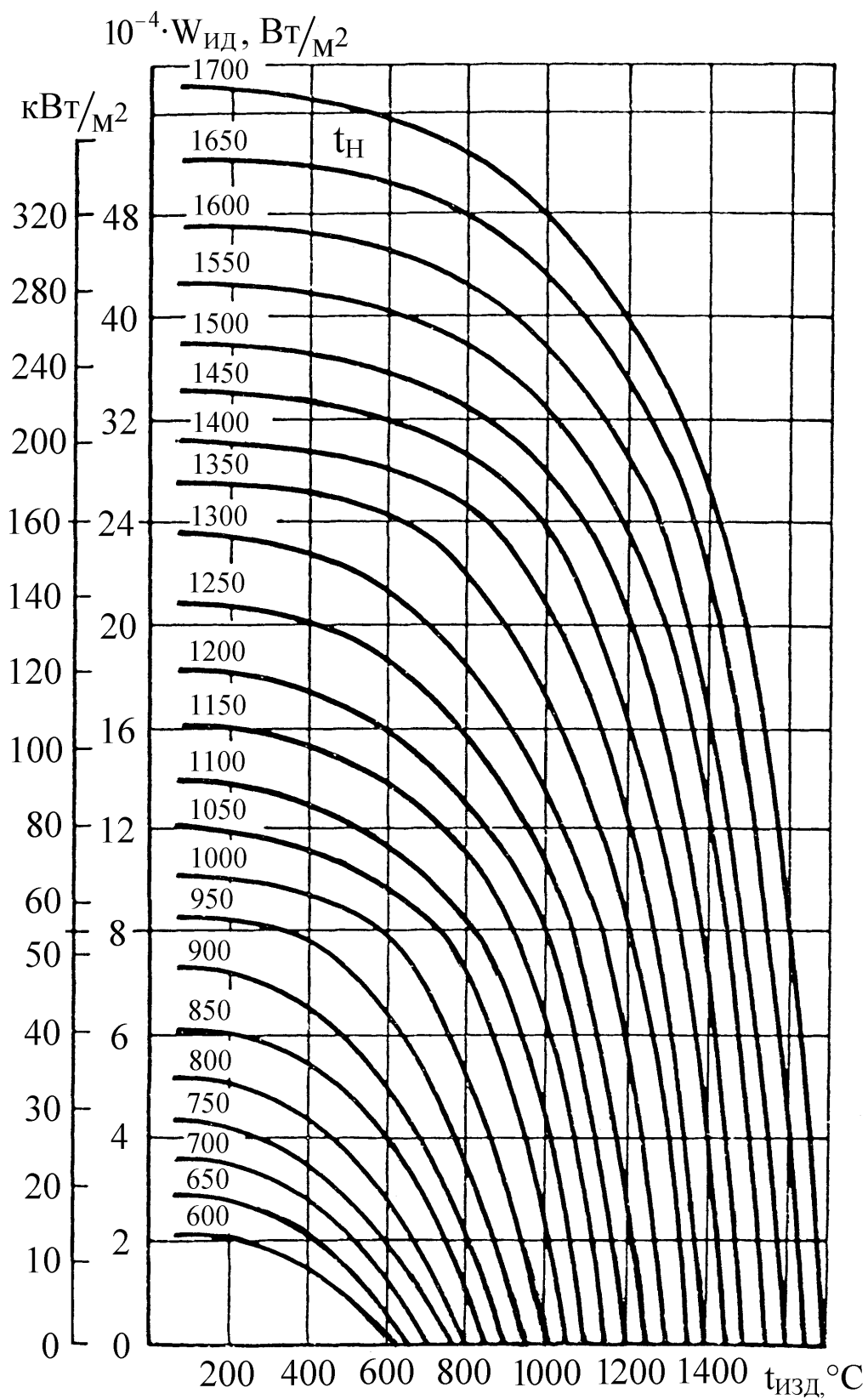


Рис. 7. Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя и мощность, приходящаяся на единицу площади футеровки при различных температурах изделия и нагревателя

Таблица 4

Значения коэффициентов эффективности $\alpha_{\text{эф}}$ [3]

Система нагревателя	$\alpha_{\text{эф}}$	Минимальные относительные межвитковые расстояния
Проволочный зигзаг	0,68	2,75
Ленточный зигзаг на крючках	0,40	0,90
То же в пазах или на выемных рамах	0,34	0,90
Проволочная спираль на полочках или на керамических трубках	0,32	2,00
То же в трубчатых пазах лабораторных печей	0,22	2,00

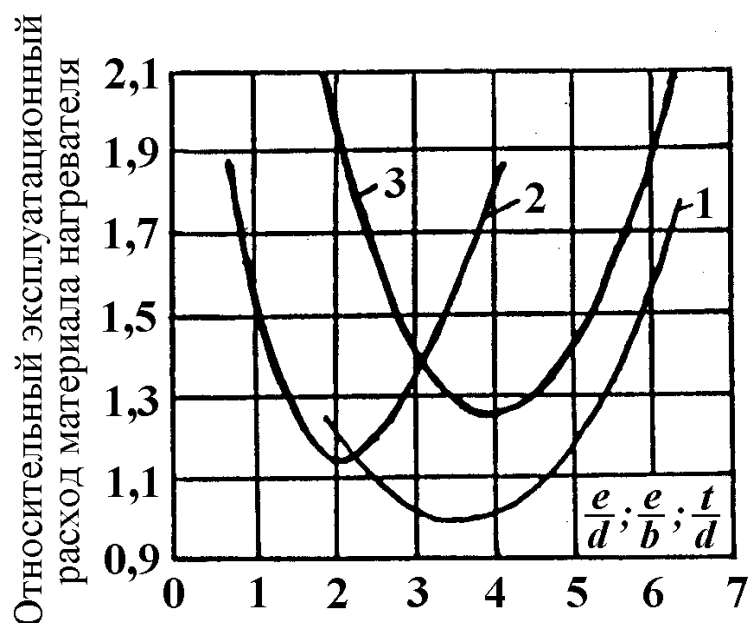


Рис.8. Зависимость относительного эксплуатационного расхода материала нагревателя от относительных межвитковых расстояний. 1 — проволочный зигзаг; 2 — ленточный зигзаг; 3 — проволочная спираль

α_{Γ} — коэффициент шага, зависит от относительных межвитковых расстояний. При минимальных относительных межвитковых расстояниях (табл.4) $\alpha_{\Gamma} = 1$. Под эксплуатационным расходом понимается расход

материала нагревателя за 1000 ч работы на 1 кВт установленной мощности.

Как видно из рис.8. кривые зависимости эксплуатационного расхода от относительного виткового расстояния имеют минимум: для проволочного зигзага $e/b=2$, для проволочной спирали $t/d=4$, для проволочного зигзага $e/d=3,5$.

Из сравнения нагревателей при этих величинах относительных межвитковых расстояний видно, что при равной выделяемой мощности нагревателя, размещенного на 1 м² поверхности футеровки, одинаковых сроках службы и одинаковых температурах печи более экономичным является проволочный зигзагообразный нагреватель.

оптимальные интервалы относительных межвитковых расстояний лежат в пределах: для ленточного зигзага $e/b_{\text{опт}}=1,4...2,6$; для проволочной спирали $t/d_{\text{опт}}=3,2...4,8$; для проволочного зигзага $e/d_{\text{опт}}=2,5...4,5$.

В настоящее время в практике конструирования с целью снижения температуры стремятся принимать следующие значения минимальных относительных межвитковых расстояний: для ленты $e/b=0,9$; для спирали $t/d=2$; для проволочного зигзага $e/d=2,75$.

Использование рекомендуемых оптимальных областей относительных межвитковых расстояний дает значительную экономическую эффективность, а именно:

1) уменьшаются единовременный и эксплуатационный расходы материала, так, например, переход с $e/b=0,9$ на $e/b=2$ для ленточного нагревателя и с $t/d=2$ на $t/d=4$ для проволочного спирального нагревателя в 1,5 раза снижает расход дефицитного сплава;

2) повышается надежность любой системы нагревателей благодаря увеличению шага и увеличивается радиус гибки;

Следовательно, можно сделать вывод, что для большинства типов промышленных электропечей наиболее рациональным является применение проволочного зигзагообразного нагревателя. Проволочный спиральный нагреватель должен применяться лишь в тех случаях, когда проволочный зигзагообразный нагреватель по тем или иным причинам неприемлем. Значения α_{Γ} определяют по графикам (Приложение П.3.6), но удобнее и точнее находить их по таблице 2, построенной на основании этих графиков. Для указанных выше оптимальных межвитковых расстояний значения α_{Γ} выделены **жирным шрифтом**.

$\alpha_{\text{с}}$ — коэффициент, учитывающий зависимость $W_{\text{д}}$ от $C_{\text{пр}}$, когда степень черноты нагревателя $\varepsilon_{\text{н}}$ или металла $\varepsilon_{\text{м}}$ и тем более обе не равны 0,8 или соотношение $F_{\text{м}}/F_{\text{ст}} < 0,8$. Он определяется по графику, приведённому в [9] или из выражения

$$\alpha_c = \frac{C_{\text{ПР}}}{3,3} \quad (84)$$

Таблица 5

Выбор коэффициента шага α_{Γ}

t/d; e/d;	α_{Γ}			t/d; e/d;	α_{Γ}		
e/b	п.с.	п.з.	л.з.	e/b	п.с.	п.з.	л.з.
0,6	—	0,40	0,68	2,8	1,33	1,01	1,88
0,7	—	0,45	0,80	2,9	1,37	1,03	1,90
0,8	—	0,51	0,91	3,0	1,40	1,04	1,92
0,9	—	0,56	1,00	3,1	1,43	1,06	1,93
1,0	0,52	0,60	1,09	3,2	1,46	1,07	1,95
1,1	0,57	0,63	1,18	3,3	1,49	1,09	1,97
1,2	0,62	0,66	1,26	3,4	1,52	1,10	1,99
1,3	0,68	0,69	1,33	3,5	1,55	1,11	2,00
1,4	0,73	0,72	1,39	3,6	1,58	1,12	2,01
1,5	0,78	0,74	1,45	3,7	1,61	1,13	2,03
1,6	0,82	0,76	1,50	3,8	1,64	1,14	2,04
1,7	0,86	0,79	1,54	3,9	1,66	1,15	2,05
1,8	0,91	0,82	1,58	4,0	1,69	1,16	2,06
1,9	0,96	0,84	1,62	4,2	1,74	1,17	2,08
2,0	1,00	0,86	1,65	4,4	1,78	1,18	2,09
2,1	1,04	0,88	1,69	4,6	1,82	1,19	2,10
2,2	1,09	0,90	1,72	4,8	1,86	1,20	2,11
2,3	1,13	0,92	1,75	5,0	1,90	1,21	2,12
2,4	1,18	0,94	1,78	5,5	—	1,23	2,14
2,5	1,22	0,96	1,80	6,0	—	1,25	2,16
2,6	1,26	0,97	1,83	6,5	—	1,26	—
2,7	1,29	0,99	1,86	7,0	—	1,27	—

$\alpha_{\text{Р}}$ — коэффициент соотношения тепловоспринимающей $F_{\text{М}}$ теплоизлучающей поверхностей $F_{\text{СТ}}$, учитывает влияние размеров садки и зависит от отношения $F_{\text{М}}/F_{\text{СТ}}$:

$$\alpha_p = 0,4 + 1,2 \cdot \left(\frac{F_M}{F_{CT}} - 0,3 \right) \text{ при } 0,3 \leq \frac{F_M}{F_{CT}} \leq 0,8, \quad (85)$$

при $F_M/F_{CT} > 0,8$ принимать $\alpha_p = 1$, а при $F_M/F_{CT} < 0,3$ нагреватель «не видит» садку и надо рассчитывать систему «нагреватель — кладка» с $\alpha_p = 1$.

$\alpha_{рол}$ — коэффициент, учитывающий затенение подовых нагревателей роликами в рольганговых печах [7]; для других печей $\alpha_{рол} = 1$.

Под расчетной поверхностью изделия подразумевается поверхность, обращенная непосредственно к нагревателям. На рис. 10 она обозначена пунктиром. В случаях *а* и *б*, когда толщина садки во много раз меньше ее длины и ширины, нагреватели в печи делятся на две группы (рис. 9): основные *1*, у которых большая доля выделяемого

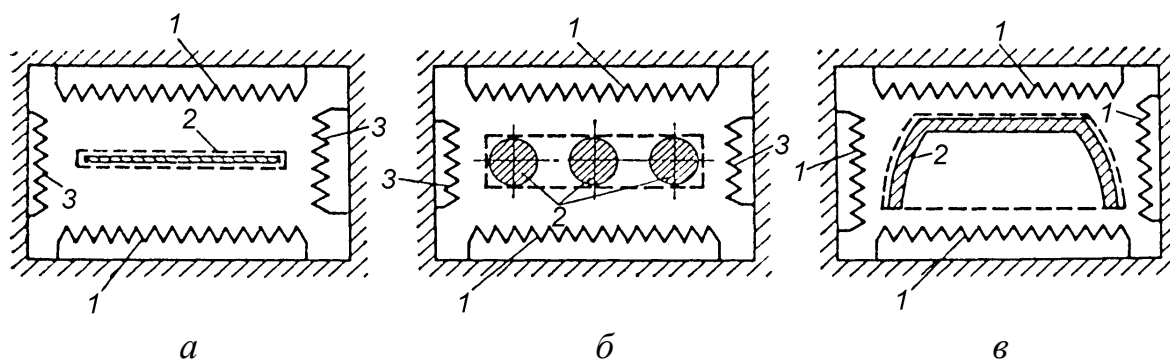


Рис. 9. Определение тепловоспринимающей поверхности садки сложной формы: *а* — тонкая пластина; *б* — составная садка; *в* — отливка. *1* — основные нагреватели; *2* — нагреваемые изделия; *3* — нагреватели для компенсации только тепловых потерь через стенки

В таких случаях при расчете W_d учитывается только поверхность изделия, обращенная к основным нагревателям, и соответственно поверхность стен, занятых ими.

Определив допустимую удельную поверхностную мощность W_d , переходят к расчету конструктивных и электрических параметров нагревателя.

Для нагревателей из материала круглого сечения (проволока, прутки) рассчитывается диаметр:

$$d = 34,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{N_1^2 \cdot \rho_t}{U^2 \cdot W_d}}, \text{ мм} \quad (86)$$

и длина:

$$l_{\text{HP}} = 0,927 \cdot \sqrt[3]{\frac{N_1 \cdot U^2}{\rho_t \cdot W_d^2}}, \text{ м.} \quad (87)$$

Для нагревателей из материала прямоугольного сечения (лента), при соотношении сторон $b/a = m$, рассчитывается толщина ленты:

$$a = 36,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{N_1^2 \cdot \rho_t}{U^2 \cdot W_d \cdot m \cdot (m+1)}}, \text{ мм.} \quad (88)$$

Длина ленты для нагревателя составит:

$$l_{\text{л}} = 1,36 \cdot \sqrt[3]{\frac{U^2 \cdot N_1 \cdot m}{\rho_t \cdot W_d^2 \cdot (m+1)^2}}, \text{ м.} \quad (89)$$

Полученные значения сечения округляются до ближайшего значения по ГОСТ (Приложение П.3.9), лучше в большую сторону. После определения размеров нагревателя производится предварительная проверка правильности выполненного расчета.

Проверка расчета нагревателя.

1. Рассчитывается действительная (реальная) поверхностная нагрузка нагревателя W_P :

$$W_P = 10^3 \frac{N_1}{F_{\text{HP}}}, \quad (90)$$

где F_{HP} — действительная (реальная) поверхность нагревателя, которая рассчитывается через длину l и периметр поперечного сечения проволоки πd или ленты $a \times b$.

2. Вычисляем погрешность $\delta = \frac{W_P - W_D}{W_D} \cdot 100\%$. Если $\delta > \pm 5\%$, то

надо пересчитать нагреватель с изменением его шага или некоторых исходных данных (напряжения, конструкции или материала).

3. Если $\delta < \pm 5\%$, то проверяется температура нагревателя:

$$t_H = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{W_P \cdot 10^{-4}}{C_{\text{HP}} \cdot \alpha_{\Sigma}} + \left(\frac{t_M + 273}{100}\right)^4} - 273, ^\circ\text{C} \quad (91)$$

Если полученная температура больше допустимой для принятого материала нагревателя, то выбирается более жаростойкий материал и производится перерасчет нагревателя.

Завершается расчет нагревателей проверкой размещения их на соответствующих стенках печной камеры. Примеры размещения и крепления нагревателей в печи приведены на рис.10. Для размещения нагревателей находят их длину в свернутом виде L и площадь, занимаемую ими.

Для спиралей:

$$L_C = \frac{l_C t}{\pi D}, \text{ м.} \quad (92)$$

Для зигзага:

$$L_3 = \frac{l_3 e}{H + 0,57e}, \text{ м.} \quad (93)$$

Диаметр спирали принимается в зависимости от размеров, мощности и температуры печи $D=(5...14) \cdot d$ по табл.6. Для лабораторных печей рекомендуемое соотношение $D=(4...9) \cdot d$. Высота зигзагообразного нагревателя принимается по данным табл. 7 и 8.

При вертикальном размещении на стенках зигзаги подвешиваются на крючках или штырях, на поду укладываются на опоры загнутыми вниз концами, а на своде либо подвешиваются на крючках, либо, как и на поду, лежат на опорах в широких пазах (рис. 10). По соображениям работоспособности при $t_H \leq 1000$ °С допускается принимать минимальный диаметр проволоки $d = 4$ мм, толщину ленты $a = 1$ мм, а далее на каждые 100 °С минимально допустимый диаметр проволоки d увеличивается на 1 мм, толщина ленты — на 0,2 мм.

Затем проверяется размещение нагревателя на отведенной для него поверхности стенки (пода, свода) F_H , которая учитывалась при расчете W_p .

Если нагреватель размещается на отведенной поверхности F_H с ошибкой ≤ 5 %, то расчет можно считать законченным. В противном случае необходимо сначала изменить зазор h в допустимых пределах, а если это не даст положительных результатов, изменить шаг спирали t или зигзага e .

Если t_H остается меньше максимально допустимой для принятого материала, то на этом расчет нагревателей считается законченным.

Максимальные и оптимальные длины и поверхности ленточных и проволочных нагревателей, размещаемых на 1 м² футеровки, приведены в приложении П.3.7 и П.3.8.

Таблица 6

Рекомендуемые отношения диаметров спирали D и проволоки d

$t_H, ^\circ\text{C}$	Отношение D/d для нагревателя на трубке из		Отношение D/d для нагревателя на полочке из	
	хромаль	нихрома	хромаль	нихрома
ниже 1000	6...12	6...14	6...10	6...10
1000...1200	6...10	6...12	5...7	5..9
1200...1300	6...10	—	—	—

Таблица 7

Предельная высота проволочного зигзага H, мм
в зависимости от материала и способа размещения в печи

Место и способ крепления	Нихром, d, мм				Хромаль, d, мм			
	6...7	8...9	10...11	12...14	6...7	8...9	10...11	12...14
свод, на крючках	215	250	280	300	150	170	190	210
под, на опорах	240	300	350	380	180	210	240	270

При размещении зигзагов на вертикальных стенках принимают H не более 600 мм для нихрома ($t_H \leq 1200 ^\circ\text{C}$) и 450 мм для хромаль ($t_H \leq 1300 ^\circ\text{C}$)

Таблица 8

Предельная высота ленточного зигзага H, мм в зависимости
от его температуры, ширины ленты и размещения в печи

Шири на ленты b, мм	H в мм в зависимости от материала, $t_H, ^\circ\text{C}$ и ориентации плоскости нагревателя									
	хромаль, вертикальная			хромаль, горизонтальная			нихром, верт.		нихром, гориз.	
$t_H, ^\circ\text{C}$	1100	1200	1300	1100	1200	1300	1100	1200	1100	1200
10	250	150	130	180	140	120	300	200	200	160
20	370	230	200	250	200	150	400	300	300	220
30	420	280	250	300	230	170	450	350	320	270

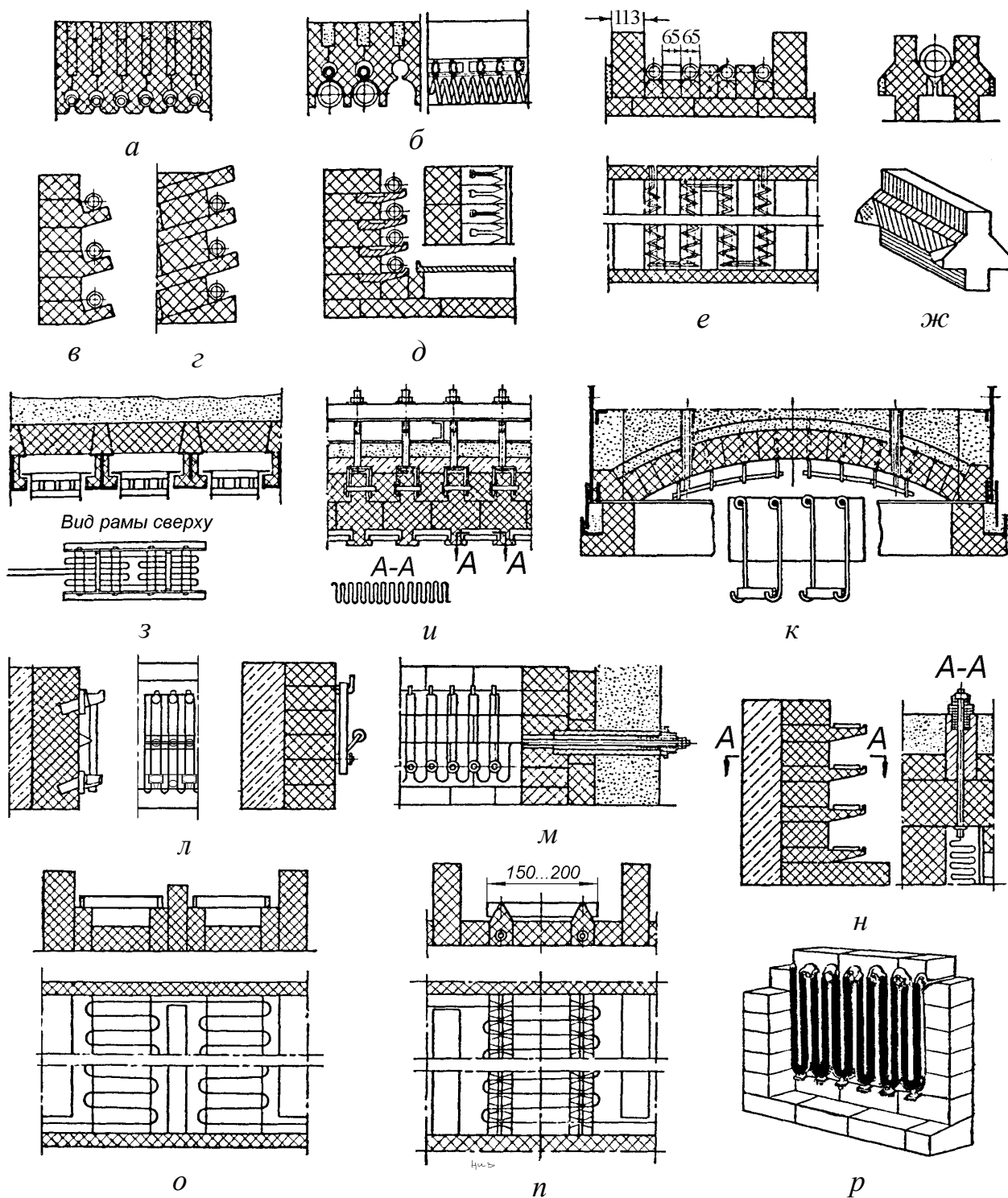


Рис. 10. Примеры размещения и крепления нагревателей в электрических печах сопротивления.

спирали в трубчатых (*a*) и открытых (*б*) пазах, на полочках вертикальных стенок (*в...д*) и в пазах (*е*) или балках (*ж*) пода;

зигзаги на рамах (*з*), в пазах (*и*) или на крючках свода, на штырях (*л, м, р*) или полочках (*н*) вертикальных стенок и в пазах пода (*о, п*);

проволочный зигзаг — *з...к, м, п*; ленточный зигзаг — *з...л, н, о*; литой нагреватель из хромалия — *р*

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

1. Текст пояснительной записки выполняется по ГОСТ 2.304-81 рукописным способом чёрными чернилами или пастой на одной стороне листа белой бумаги формата 210×297 мм.

Допускается текст пояснительной записки выполнять синими чернилами или пастой.

Высота букв и цифр не менее 2,5 мм. С разрешения руководителя проекта ПЗ может быть отпечатана через два интервала. Формулы в машинописный текст вносятся от руки.

Заголовки и подзаголовки ПЗ не подчёркиваются и не выделяются другим цветом.

Описки, опечатки и графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения документа, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на той же месте исправленного текста рукописным (или другим) способом чёрной пастой чернилами или тушью.

2. Рамку и основные надписи на листах пояснительной записки курсового и дипломного проектов следует выполнять по формам в соответствии с ГОСТ 2.106-96 и ГОСТ 2.104-68 (прил. 1). В форме 2а (рис. 3) допускается опустить графы (14), (15), (16), (17) и (18).

3. Текст ПЗ должен излагаться кратко, технически и стилистически грамотно. Не допускается дословное воспроизведение текста из литературных источников, не рекомендуется обширное описание общеизвестных материалов. Достаточно привести техническую характеристику и принципиальные особенности, имеющие значение для проекта.

При повторном определении тех или иных параметров и величин допускается промежуточные выкладки опускать и приводить лишь конечные результаты со ссылкой на методику их получения или свести их в таблицу.

4. Записка должна разделяться на разделы и подразделы. Каждому разделу пояснительной записки присваивается номер, обозначаемый арабскими цифрами без точки.

При наличии подразделов их номера состоят из номера раздела и порядкового номера подраздела с точкой между ними. В конце точка также ставится (например, 2.3.).

Подраздел допускается разбивать на пункты, нумерация которых выполняется аналогично, например, 1.2.3 означает: раздел первый, подраздел второй, пункт третий.

Наименование разделов и подразделов должны быть краткими и соответствовать содержанию. Записывают эти наименования в виде заголовка с

абзаца (отступление на 15–17 мм) строчными буквами (кроме первой прописной).

Переносы слов в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений их разделяют точкой.

5. Расстояние между заголовками и последующим текстом должно быть равно 15 мм. Расстояние между заголовками раздела и подраздела — 8 мм.

Расстояние между последней строкой текста и последующим заголовком рекомендуется 10–15 мм. Пример выполнения текста дан в приложении 2.

6. Применяемые термины и определения должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам или, при их отсутствии, являться общепринятыми в технической литературе.

7. При наличии расчётов в пояснительной записке, они в общем случае, должны содержать:

- эскиз или схему рассчитываемого изделия;
- задачу расчета (с указанием, что требуется определить);
- данные для расчёта;
- условия расчёта;
- расчёт;

8. Условные буквенные обозначения математических, физических и других величин, а также сокращения слов в тексте и надписях под рисунками должны соответствовать государственным стандартам (ГОСТ 2.321-84).

Если в записке принята особая система сокращения слов или наименований, то должен быть приведён перечень принятых сокращений, который помещают в конце ПЗ перед списком литературы.

9. Наименование изделия на титульном листе, в основной надписи ПЗ и при первом упоминании в тексте записки должно быть полным и одинаковым с наименованием его в основном графическом документе (ГОСТ 2.105-95). В последующем тексте допускается употреблять сокращенное наименование изделия и произвольный порядок слов в наименовании, например, «Рама трактора ДЭТ-250 в сборе».

10. Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулы, должны быть приведены непосредственно под соответствующими формулами, например:

$$S=Vt, \quad (1)$$

где S — пройденный путь, м;

V — скорость движения, м/с;

t — время, с.

Все формулы должны быть пронумерованы арабскими цифрами в скобках, которые располагают против формулы в крайнем правом положении.

Ссылки в тексте на номер формулы дают в скобках, например, «...в формуле (1)...».

11. Когда в тексте записки приводится ряд числовых величин одной размерности, единица измерения указывается только в конце ряда, например: 10, 15, 47 кВ.

Единицы измерения в тексте следует приводить в единицах международной системы (СИ) — по ГОСТ 8.417. Допускается приводить в круглых скобках рядом с величинами в принятой системе единиц значения величины в системе единиц использованной в первичном документе или в работе.

12. Все иллюстрации в ПЗ (эскизы, схемы, графики) называются рисунками и их нумеруют в пределах раздела. Номер рисунка в разделе, например, рис.1.1. Допускается сквозная нумерация рисунка в пределах всего документа, например, рис.2. На все иллюстрации в тексте ПЗ должны быть ссылки (первая — делается в виде «рис.5.3», а на все последующие в виде «см. рис. 5.3»). Иллюстрации должны размещаться в тексте не ранее той страницы, на которой содержится первая ссылка на нее, но необязательно сразу же после этой ссылки. Иллюстрации имеют наименование и при необходимости пояснительные данные (подрисуночный текст). Пример выполнения рисунков приведен в приложении 3.

13. Иллюстрации, таблицы, программы и другие документы для расчётов на ЭВМ или текст вспомогательного характера допускается давать в виде приложений к ПЗ. Иллюстрации и таблицы в приложениях нумеруются.

В тексте ПЗ на все приложения должны быть ссылки, а в оглавлении ПЗ следует перечислить все приложения с указанием их номера и заголовка.

При выпуске приложений отдельным документом в виде альбома на его титульном листе под наименованием указывают слово «Приложение». Основную надпись (форма 2) помещают на странице, следующей за

титulyным листом, а на последующих страницах — надпись по форме 2а (приложение 1, рис.3 и 4).

14. Цифровой материал записки оформляется в виде таблиц по ГОСТ 2.105-95 каждая таблица должна быть пронумерована. Нумерация таблиц производится по такой же схеме, что и рисунки (в пределах раздела, главы либо всего текста ПЗ). Таблица и ее номер помещается над левым верхним углом ее на уровне левого края поля таблицы. Название таблицы помещается после номера таблицы. Примеры выполнения таблиц приведены в приложении 4.

Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, таблицу делят на части, которые в зависимости от особенностей таблицы, переносят на другие листы или помещают на одном листе рядом или под передней частью, при этом в каждой части таблицы повторяют её заголовок и боковик. Слово «Таблица», её номер и заголовок указывают один раз над первой частью таблицы, а над другими частями пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием её номера.

Графу «№ п/п» в таблицу не включают. При необходимости нумерации показателей или других данных порядковые номера указывают в боковине таблицы перед её наименованием.

Повторяющийся в графе таблицы текст допускается заменять словами «то же», которые далее заменяются кавычками. Не допускается заменять кавычками в таблицах повторяющиеся цифры, математические и другие символы, марки материалов и т.п. Если цифровые данные в графах таблицы выражены в различных единицах физических величин, их указывают в подзаголовки каждой графы.

Слова «более», «не более», «менее», «не менее» и др. должны быть помещены в одной строке или графе таблицы с наименованием соответствующего показателя (после единицы физической величины), если они относятся ко всей строке или графе.

Числовые значения величин в одной графе должны иметь, как правило, одинаковое количество десятичных знаков.

При указании в таблицах последовательных интервалов значений величин, охватывающих все значения ряда, перед ними пишут «От... до... включ.», «Св... до... включ.». В интервале, охватывающем числа ряда между крайними числами ряда в таблице допускается ставить тире.

Интервалы чисел в тексте записывают со словами «от» и «до» (имея в виду «От... до... включительно»), например «...толщина слоя должна быть от 0,5 до 2,0 мм» или через дефис, например «пп. 7-12», «рисунок 1-14». Пределы размеров указывают от меньших к большим.

15. Правила выполнения диаграмм, изображающих функциональную зависимость двух или более переменных величин в системе координат устанавливают рекомендации ЕСКД Р50-77-88. Диаграммы для

информационного изображения функциональных зависимостей допускается выполнять без шкал значений величин.

В прямоугольной системе координат независимую переменную, как правило, следует откладывать на горизонтальной оси (оси абсцисс), положительные значения величин откладываются на оси вправо и вверх от точки начала отсчёта. В диаграмме без шкал оси координат следует заканчивать стрелками, указывающими направления возрастания значений величин.

При выполнении диаграмм в прямоугольной (пространственной) системе трёх координат функциональные зависимости следует изображать в аксонометрической проекции по ГОСТ 2.317069.

В диаграммах, изображающих несколько функций различных переменных, а также в диаграммах, в которых одна и та же переменная должна быть выражена одновременно в различных единицах, допускается использовать в качестве шкал как линии координатной сетки, ограничивающие поле диаграммы, так и прямые, расположенные параллельно координатным осям (приложение 3, рис.2).

Числа у шкал следует размещать вне поля диаграммы и располагать горизонтально; допускается при необходимости наносить числа у шкал внутри поля диаграммы. Многозначные числа предпочтительно выражать как кратные 10^n , где n — целое число. Коэффициент 10^n следует указывать для данного диапазона шкалы.

Диаграммы следует выполнять линиями по ГОСТ 2.303-68. Оси координат, оси шкал, ограничивающие поле диаграммы, следует выполнять сплошной линией. Линии координатной сетки и делительные штрихи следует выполнять сплошной тонкой линией.

Единицы измерения следует наносить в конце шкалы, между последним и предпоследним числами шкалы (при недостатке места допускается не наносить предпоследнее число), или вместе с наименованием переменной величины после запятой, или в конце шкалы после последнего числа вместе с обозначением переменной величины в виде дроби, в числителе которой наносят обозначение переменной величины, а в знаменателе — обозначение единицы измерения (приложение 3, рис.2).

Единицы измерения углов (градусы, минуты, секунды) следует наносить один раз — у последнего числа шкалы.

Диаграмма может иметь пояснительную часть (текстовую, графическую), разъясняющую применённые в диаграмме обозначения, которая размещается после наименования диаграммы или на свободном месте поля диаграммы.

Пересечение надписей и линий не допускается. При недостатке места следует прервать линию.

16. Нумерация листов пояснительной записки должна быть сквозной для текста и приложений, начиная с титульного листа. Проставляется

нумерация с третьего листа (титульный лист и техническое задание не нумеруются). Номер листа проставляется в основной надписи справа внизу.

Титульный лист является первым листом пояснительной записки. В приложении 5 дан титульный лист для курсового проекта и в приложении 6 — для дипломного проекта.

17. Аннотация помещается на третьем листе пояснительной записки, имеющем основную надпись по форме 2 ГОСТ 2.104-68 (приложение 7). Аннотация (в соответствии с ГОСТ 7.0-84) представляет краткую характеристику проекта с точки зрения содержания, назначения, формы и других особенностей. Она включает основную тему проблемы, цели работы. В аннотации указывают, что нового несёт в себе данная работа. Пример выполнения аннотации приведён в приложении 7.

18. За аннотацией помещается оглавление, в котором вносятся номера и наименование разделов и подразделов с указанием соответствующих страниц, список литературы, перечень приложений и другой документации, относящейся к курсовому или дипломному проекту. Пример выполнения оглавления приведён в приложении 8.

19. В конце ПЗ приводится список литературы, нормативно технической документации и других документов используемых при вычерчивании чертежей схем и составлении записки. Ссылка на литературные источники делается указанием порядкового номера на этот источник, заключенный в квадратные скобки. Если в одной ссылке необходимо указать несколько источников, то их номера указываются в одних скобках в порядке возрастания через запятую или тире (если номера следуют подряд, например, [5–9]). Список литературы составляется либо в алфавитном порядке, либо в порядке использования источника.

20. Спецификации, сопровождающие сборочные чертежи дипломного и курсового проектов, определяют состав изображённого изделия и необходимы для комплектования конструкторских документов и планирования запуска изделия в производство.

Рекомендуется с учебной целью составление спецификаций, сопровождающих чертежи общих видов. Исполняются спецификации на отдельных бланках А4.

Каждый раздел записывается в виде заголовка в графе спецификации «Наименование» и подчёркивается. Пример заполнения спецификации приведён в приложении 9.

Рекомендуются следующие правила заполнения спецификации. В верхней после головки спецификации строке с прописной буквы записывается наименование раздела и подчёркивается. Отступают одну строку и вписывают наименование специфицируемых документов с соответствующими обозначениями. Отступают ещё одну строку

записывают следующий раздел, подчёркивая его. С отступлением в одну строку вписывают элементы этого раздела и т.д.

В спецификациях учебных проектов допускается после записи всех наименований элементов данного раздела (особенно в разделах «Стандартные изделия» и «Материалы») пропускать две-три строки для дополнительных записей. Можно резервировать и номера позиций, которые проставляются в спецификацию при заполнении резервных строк.

Допускается совмещение спецификаций со сборочным чертежом при условии их размещения на листе А4.

Оформление библиографии(списка литературы) производится в соответствии ГОСТ 7.1-84 по следующим основным правилам.

а) Фамилия и инициалы автора. Если авторов не более трех, то перечисляются все, если авторов четыре, то все четыре автора указываются после названия книги через косую черту (/), точка после которой не ставится, но инициалы каждого автора должны быть впереди его фамилии. Если авторов более четырех, указываются первые три автора, а далее вместо остальных пишется «и др.»

б) Название источника приводится без кавычек. Сокращение не допускается. Если есть подзаголовок, он пишется с большой буквы после основного и отделяется двоеточием. После названия ставятся точка и тире. Если имеется редактор, указываются его инициалы и фамилия после косой черты: / Под ред.<инициалы и фамилия редактора> . Аналогично, если источник переводной, в библиографии указываются переводчик и редактор: / Пер. с англ.: <инициалы и фамилии переводчика>. Под ред. <инициалы и фамилия редактора>. Отдельные книги, создаваемые коллективом авторов, библиографически могут начинаться с названия, а не с фамилий. В этом случае фамилии авторов указываются после названия через / <инициалы и фамилии авторов>.

в) Место издания (город, перед которым ставится точка и тире) пишется с большой буквы полностью, после названия города ставится двоеточие. Допускаются только сокращения М., Л., СПб.

г) Название издательства пишется с большой буквы без кавычек. Если в название издательства входит слово «Издательство», его пишут сокращенно «Изд-во», без кавычек, а само название может быть в кавычках (как в оригинале). После издательства ставится запятая.

д) Год издания. Слово «год» не пишется. После года (четырёхзначного числа) ставится точка и тире.

е) Следующий элемент — после тире указывается объем источника (книги) в виде числа с буквой «с.» (страниц).

ж) При ссылке на статьи и журналы указываются: фамилия и инициалы автора. Название статьи // Название журнала. — Год выпуска. — Номер журнала. — Номера страниц, занимаемые статьей (например, С. 40–45).

Приложения оформляют как продолжение записки. Каждое приложение начинается с новой страницы, в правом верхнем углу пишется слово «Приложение», ставится его номер арабскими цифрами без кавычек и символов №, пишется название, которое оформляется как заглавие раздела и приводится в оглавлении, затем следует содержание приложения. Если в записке имеется лишь одно приложение, то его не нумеруют.

9. **Спецификации**, сопровождающие чертежи общих видов, исполняются согласно ГОСТ 2.108-68 на отдельных бланках формата А4 и приводятся в ПЗ после приложения.

Спецификации в общем случае состоят из разделов, которые обычно располагаются в следующей последовательности:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Приложение 2

ОФОРМЛЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. Чертежи и схемы должны быть выполнены на листах основных форматов установленных ГОСТ 2.301-68. Формат чертежа определяется размерами внешней рамки, выполненной тонкой линией. Линии рамки чертежа наносят на расстоянии 5 мм от внешней и выполняют сплошной основной линией. Для брошюровки чертежей в альбом оставляют у левого края листа (в пределах формата) свободное поле шириной 20 мм.

В том же ГОСТ 2.301-68 устанавливаются основные и дополнительные форматы чертежей. За основные принимают формат 841×1189 мм и другие форматы, полученные путём последовательного деления его на две равные части параллельно меньшей стороне соответствующего формата.

Обозначения и размеры основных форматов указаны в табл. П2.1.

Дополнительные форматы образуются увеличением коротких сторон основных форматов на величину, кратную их размерам. Например: А0×2, А4×8 и т.д.

Таблица П.1

Обозначения и размеры форматов чертежей

Обозначение формата	Размеры, мм	Обозначение формата	Размеры, мм
A0	841×1189	A3	297×420
A1	594×841	A4	210×297
A2	420×594	A5	148×210

2. Изображение изделия на чертеже выполняется в масштабе, указанном ГОСТ 2.302-68 (табл. П. 2).

Таблица П.2

Масштабы для изображения изделий

Масштабы уменьшения	1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:100; 1:200; 1:400; 1:500; 1:800; 1:1000
Натуральная величина	1:1
Масштабы увеличения	2:1; 2,5:1; 4:1; 10:1; 20:1; 40:1; 50:1; 100:1

3. Для иллюстрации доклада при защите проекта допускается изготовление (на отдельных листах формата A1 и A2) плакатов (ГОСТ 2.605-68) с отображением необходимых дополнительных материалов: графиков, эскизов, схем конструкций, формул и т.д. Плакат должен иметь такой же вид, какой имели бы увеличенные фотографическим путём схемы, таблицы и т.п., то есть должен иметь пропорционально увеличенные по толщине типы линий, цифровые, буквенные обозначения и надписи. Указания о принадлежности плакатов к определённому дипломному проекту должны помещаться в правом нижнем углу их оборотной стороны. Рамка на плакатах не делается. 4. Начертание, основное назначение и толщины линий чертежей всех отраслей промышленности определены ГОСТ 2.303-68 (см. табл.П 3).

Специальное назначение линий (изображение резьбы, шлицев, границы зон с различной шероховатостью и т.д.) определены в соответствующих стандартах Единой системы конструкторской документации: ГОСТ 2.308-79, ГОСТ 2.309-73, ГОСТ 2.311-68, ГОСТ 2.409-74 и др.





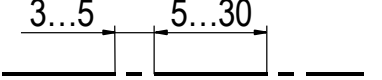
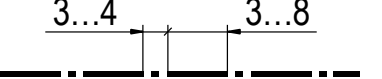
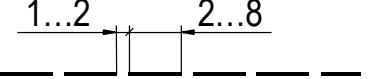
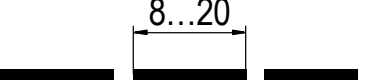
Выбор конкретной толщины S сплошной основной линии зависит от величины и сложности изображения, а также от формы чертежа.

Толщина линий одного и того же типа должна быть одинакова для всех изображений на данном чертеже, вычерчиваемых в одинаковом масштабе.

Наименьшая толщина линий, выполненных в карандаше, 0,3 мм.

Таблица П 3

Наименование, начертание и толщина линий

Наименование	Начертание	Толщина
Сплошная основная		$S = (0,5 \dots 1,4) \text{ мм}$
Сплошная тонкая		От $S/3$ до $S/2$
Сплошная тонкая с изломами (длинные линии обрыва)		— « —
Сплошная волнистая		— « —
Штрихпунктирная тонкая		— « —
Штрихпунктирная утолщённая		От $S/2$ до $2/3 S$
Штриховая		От $S/3$ до $S/2$
Разомкнутая		От S до $3/2 S$

5. Основная надпись на чертежах располагается, в правом нижнем углу. В учебной конструкторской документации имеются некоторые специфические особенности заполнения основной надписи. В графы, пронумерованные цифрами в скобках на (см. рис.1 – 4, приложения 1), записывают:

в графу (1) — наименования изделия, например «Горелка инжекционная». В соответствии с ГОСТ 2.109-73 наименования изделия должно быть по возможности кратким и записываться в именительном падеже единственного числа. Если наименование состоит из нескольких слов — на первом месте помещают имя существительное;

в графу (2) — вносится обозначение документа по ГОСТ 2.201-80. Документам дипломных проектов, охватываемых настоящим стандартом (СТП), присваивается предметное, обозначение нижеследующей структуры:

1105	2000	118	07	00	СБ
1	2	3	4	5	6

где 1 — шифр специальности;
 2 — год разработки;
 3 — последние три цифры номера студенческого удостоверения;
 4 — номер сборочной единицы или схемы;
 5 — номер детали (позиция её на чертеже сборочной единицы);
 6 — обозначение кода чертежа: ВО — общий вид, СБ — сборочный, ГЧ — габаритный, МЧ — монтажный, ПЗ — пояснительная записка, МЭ — электромонтажный, УЧ — упаковочный чертёж, ЭЗ — схема электрическая принципиальная и т.п. Чертежу детали код не присваивается.

Если заполняется графа (2) основной надписи документа курсового проекта, то структура обозначения принята следующего вида:

ФМ-318	23	08	40	00	ВО
1	2	3	4	5	6

где 1 — шифр факультета и номер академической группы;
 2 — номер темы задания на бланке кафедры;
 3 — вариант исходных данных;
 4 — номер сборочной единицы на схеме;
 5 — номер детали;
 6 — обозначение документа (ВО — общий вид, ПЗ — пояснительная записка, ЭЗ — схема электрического подключения и т.п.)

в графу (3) основной надписи — материал детали по соответствующему государственному стандарту и обозначение этого стандарта. Графа заполняется только на чертежах деталей.

Обозначение материалов производится по ГОСТ 2.109-73. Допускается два варианта обозначения материалов, например, Сталь 45 ГОСТ 1050-88, или с указанием сортамента:

	5×50 ГОСТ	103-76
Полоса	Ст3 ГОСТ	535-88

Если в условное обозначение материала входит сокращённое наименование данного материала «Ст», «СЧ», «КЧ», «Бр», «АЛ» и другие, то полное наименование «Сталь», «Серый чугун», «Ковкий чугун», «Бронза», «Алюминиевый сплав» и другие не указывают, например, Ст3 ГОСТ 380-88;

в графу (4) — буквенное обозначение литеры документа по ГОСТ 2.103-68. Для дипломных проектов принята литера «Д», для курсовых — «К»;

в графах (5) и (6) соответственно указываются масса изделия в кг и масштаб его изображения на данном чертеже;

в графу (7) — порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графу не заполняют);

в графу (8) — общее количество листов документа (графу заполняют только на первом листе);

в графу (9) — сокращённое обозначение учебного заведения и кафедры, на которой выполняется проект, например, ЮУрГУ кафедра ФМиФТТ;

в графу (10) — характер работы, выполняемой лицом, подписывающим документ: Разраб. — студент, выполняющий работу; Пров. — руководитель проекта; Конс. — консультанты по соответствующей части проекта (например; Т. контр. — технологический контроль; Конс. эк. — консультант по организационно-экономической части; Конс. ТБ — консультант по охране труда и технике безопасности и т.п.); Н. контр. — нормоконтролёр; Утв. — заведующий кафедрой; в графах (11), (12) и (13) — фамилия подписи и исполняющих и утверждающих документ лиц и дата;

в графы (14), (15), (16), (17), (18) записываются соответствующие номера документа, на основании которых вносятся изменения в данный чертёж.

6. Технические требования к изделию, размещают над основной надписью, а техническую характеристику выше, либо на свободном поле чертежа в виде таблицы или текстовой части. Пункты технических требований и технической характеристики должны иметь самостоятельную нумерацию. Каждый пункт записывают с новой строки, причём строки не должны быть более 185 мм.

При выполнении чертежа на двух листах и более технические требования, и техническую характеристику помещают только на первом листе. В соответствии с ГОСТ 2.316-68 заголовок «Технические требования» не пишут, если на чертеже помещены только технические требования и нет технической характеристики.

Технические требования излагают в следующем порядке:

а) требования к материалу, заготовке, термической обработке и к свойствам материала готовой детали (например, твёрдость поверхности), указания материалов-заменителей;

б) размеры (справочные, литейные уклоны, радиусы и пр.), предельные отклонения размеров, формы и расположения поверхностей;

в) требования к качеству поверхностей, отделке и вид покрытия;

г) расположение отдельных элементов конструкции, зазора;

д) требования к настройке, регулированию;
е) другие требования к качеству изделия;
ж) условия и методы испытаний;
з) указания о маркировке и клеймении;
и) правила транспортирования и хранения;
к) особые указания эксплуатации;
л) ссылка на другие документы, содержащие требования к данному изделию, но не приведённые на чертеже;

Указанная последовательность является рекомендательной и при необходимости может быть изменена или сокращена.

Техническую характеристику помещают под заголовком «Техническая характеристика» отдельно от технических требований. Оба заголовка не подчёркивают.

7. На чертежах расположения (планах и разрезах) технологического, санитарно-технического и другого оборудования указывают:

— оборудование — в виде упрощённых контурных очертаний или условными графическими изображениями сплошной основной линией по ГОСТ 2.303-68;

— строительные конструкции — в виде упрощённых контурных очертаний сплошной тонкой линией по ГОСТ 2.303-68;

— координатные оси здания или сооружения и расстояние между ними отметка чистых полов и основных площадок;

— привязку оборудования к координационным осям или элементам конструкций.

8. Условные изображения элементов зданий, сооружений и конструкций на планах и разрезах должны соответствовать ГОСТ 21.107-78. Отметки уровня (высоты, глубины) элементов конструкции от отсчётного уровня (условной «нулевой» отметки) указывают в метрах с тремя десятичными знаками.

На видах (фасадах), разрезах и сечениях отметки помещают на выносных линиях контура и обозначают знаком «↓».

Отметку выше «нулевой» указывают без знака, а ниже со знаком минус.

На планах отметки наносят в прямоугольнике или на поле линии-выноски. В этих случаях отметки указывают со знаком «+», «-».

9. В названиях разрезов, сечений и видов указывают обозначение соответствующей секущей плоскости, например: «Разрез 1-1».

10. Чертёж общего вида должен содержать:

а) изображение изделия (виды, разрезы, сечения), текстовую часть надписи, необходимую для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействие его основных частей и принципа работы изделия;

б) наименование и обозначение трёх составных частей изделия, для которых необходимо указать данные или запись которых необходима для

пояснения изображений общего вида, описания принципа работы изделия и др.;

в) размеры;

г) схему (если она требуется);

д) технические характеристики.

11. Наименование и обозначения указывают:

— на полках линий выносок;

— в таблице размещённой на том же листе, что и изображение изделия;

— в таблице, выполненной на отдельных листах формата А4.

При наличии таблицы на полках линий — выносок указывают номера позиций составных частей, включённых в таблицу. Таблица состоит из граф: «Поз.», «Обозначение», «Кол.», «Дополн. указания».

12. Правила изображения изделий, а также расположение изображений на чертеже устанавливает ГОСТ 2.305-68. Общие требования к чертежам, в том числе к сборочным, устанавливает ГОСТ 2.109-73. Оформление чертежей некоторых изделий определяют следующие стандарты: изображение резьбы — ГОСТ 2.311-68, пружин — ГОСТ 2.401-68, элементов передач — ГОСТ 2.402-68...ГОСТ 2.406-76, ГОСТ 2.407-75, звёздочек — ГОСТ 2.408-68, шлицев — ГОСТ 2.409-75, металлических конструкций — ГОСТ 2.410-68, швов сварных конструкций — ГОСТ 2.312-72, подшипников качения — ГОСТ 2.420-69, труб и трубопроводов — ГОСТ 2.411-72, плат печатных — ГОСТ 2.417-91. Чертежи штампов выполняются по ГОСТ 2.428-84. Ремонтные чертежи выполняются по ГОСТ 2.604-68.

13. Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки — по ГОСТ 2.310-68, указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий — по ГОСТ 2.314-68.

Приложение 3

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Таблица П.3.1

Плотность γ и коэффициент теплопроводности λ
некоторых металлов и сплавов [2, 3]

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 08кп	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							
P18, P6M5	8690	24	27	28	27	26	28
3X13, 3X2B8	8200	25	27	27	26	25	27
X18H9	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	—	—	—

Таблица П.3.2.

Средняя теплоёмкость некоторых металлов, сталей и сплавов в интервале температур от 0 до t , °С, кДж/(кг·К) [11]

Металл или сплав	Температура, °С								
	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

Таблица П.3.3.

Степень черноты ε для различных материалов [2]

Наименование	Температура, °С	ε
Кирпич диносовый	100	0,80
	1100	0,85
Кирпич шамотный шероховатый	20	0,80...0,90
Никель, окисленный при 600°С	200...600	0,37...0,48
Нихром	125...1035	0,64...0,76
Нихромовая проволока окисленная	50...500	0,95...0,98
Оксид алюминия	1200...1700	0,23...0,40
Сталь оцинкованная окисленная	20	0,28
Сталь полированная	740...1040	0,52...0,56
Титан	600	0,217
	1200	0,286
Чугун, окисленный при 600°С	200...600	0,64...0,70

Таблица П.3.4.

Допустимые удельные поверхностные
нагрузки нагревателей, Вт/см²[3]

Рабочая температу ра	Металлические нагреватели из сплавов			Неметаллические нагреватели из	
	X20H80, X15Ю5	X23Ю5Т	X27Ю5Т	SiC	MoSi ₂
600	2,6...3,2	—	—	—	—
700	2,0...2,6	3,0...3,7	—	—	—
800	1,6...2,0	2,6...3,2	—	—	—
900	1,1...1,5	2,1...2,6	—	—	—
1000	0,8...1,0	1,6...2,0	3,0	—	—
1100	0,5...0,7	1,2...1,5	2,2	—	—
1200	—	0,8...1,0	1,6	21	—
1250	—	—	—	18	—
1300	—	—	1,2	14	—
1350	—	—	—	10	—
1400	—	—	—	5	15
1500	—	—	—	—	13
1600	—	—	—	—	7

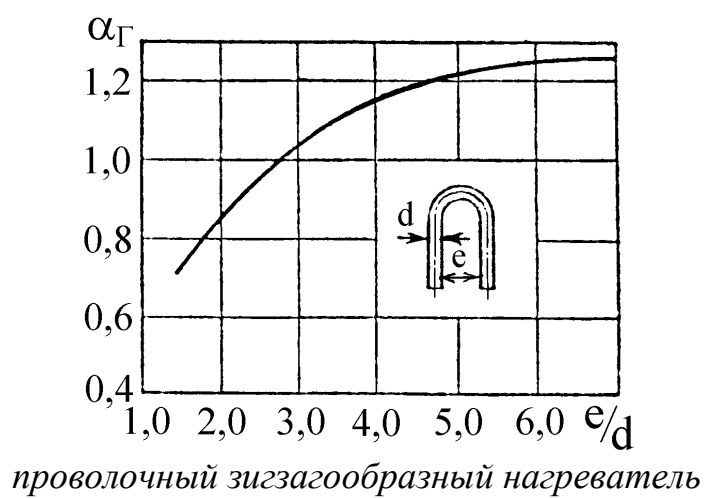
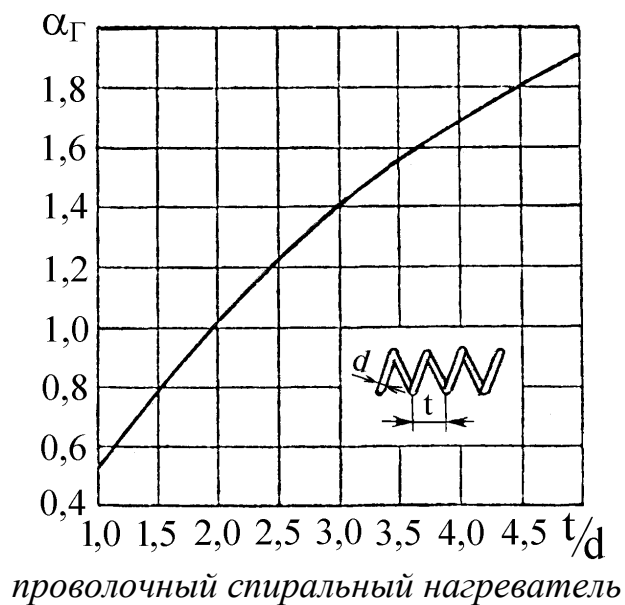
Таблица П.3.5.

Удельная поверхностная нагрузка
в печах с калориферами, Вт/см²[3]

Скорость движения воздуха в печи, м/с	Температура нагрева воздуха, °С	
	200	500
5	3,0...4,0	1,0...1,5
10	4,0...5,0	1,5...2,0
15	5,5...6,5	2,0...2,5
20	7,0...8,0	2,5...3,0

Примечание. Большие значения принимаются для меньших сечений нагревателей.

П 3.6. Зависимость α_{Γ} от относительного межвиткового расстояния для различных типов нагревателей [2]



П.3.7. Максимальные и оптимальные длины и поверхности ленточного нагревателя, размещаемые на 1 м² футеровки [4]

Сечение, мм ²	При $e/b = 2,0$		При e/b
	$l_{\text{ОПТ}}, \text{ м}$	$F_{\text{ОПТ}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{МАКС}}, \text{ м}$
2×10	38	0,915	84
1,5×15	25	0,825	55,5
2×15	25	0,860	55,5
2,2×20	19	0,845	42
2,5×20	19	0,855	42
3,0×20	19	0,875	42
2,2×25	15	0,815	33,5
2,5×25	15	0,825	33,5
3,0×25	15	0,840	33,5
2,2×30	12,5	0,805	25 *
2,5×30	12,5	0,813	25 *
3,0×30	12,5	0,825	25 *
2,2×36	10,5	0,802	19 **
2,5×36	10,5	0,808	19 **
3,0×36	10,5	0,820	19 **
2,2×40	9,5	0,802	21
2,5×40	9,5	0,807	21
3,0×40	9,5	0,818	21

* $e/b = 1,0$

** $e/b = 1,1$

П.3.8. Максимальные и оптимальные длины и поверхности
проволочного нагревателя, размещаемые на 1 м² футеровки [2,9]

d , мм	Зигзагообразный нагреватель на крючках при e/d , равном				Спиральный нагреватель на полочках при t/d , равном			
	2,75		3,5		2		4	
	$l_{\text{МАКС}}$, м	$F_{\text{МАКС}}$, м ²	$l_{\text{ОПТ}}$, м	$F_{\text{ОПТ}}$, м ²	$l_{\text{МАКС}}$, м	$F_{\text{МАКС}}$, м ²	$l_{\text{ОПТ}}$, м	$F_{\text{ОПТ}}$, м ²
4	—	—	—	—	200	2,46	100	1,23
4,5	—	—	—	—	180	2,46	90	1,23
5	—	—	—	—	160	2,46	85	1,23
5,6	—	—	—	—	140	2,46	70	1,23
6,3	—	—	38	0,745	125	2,46	62,5	1,23
7	43	0,95	34	0,745	115	2,46	57,5	1,23
8	38	0,95	30	0,745	100	2,46	50,0	1,23
9	34	0,95	27	0,745	—	—	—	—
10	30	0,95	24	0,745	—	—	—	—
11	27	0,95	21	0,745	—	—	—	—
12	25	0,95	20	0,745	—	—	—	—
13	23	0,95	18	0,745	—	—	—	—
14	21	0,95	17	0,745	—	—	—	—
15	20	0,95	16	0,745	—	—	—	—
16	19	0,95	15	0,745	—	—	—	—
17	18	0,95	14	0,745	—	—	—	—
18	17	0,95	13,5	0,745	—	—	—	—
19	16	0,95	12,5	0,745	—	—	—	—
20	15	0,95	12	0,745	—	—	—	—

П.3.9. Сортамент проволоки и ленты по ГОСТ 12766.1-77...12766.5-77

ГОСТ	Вид проката	Сортамент, мм
12766.1–77	Проволока холодно-тянутая	$d = 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32; 0,36; 0,40; 0,45; 0,50; 0,56; 0,63; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6;$
12766.4–77	Прокат горяче-катаный	$d = 6,3; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 12,0; 14,0;$
12766.2–77	Лента холодно-катаная	$a = 1,0; 1,1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0;$ $b = 6; 8; 10; 12; 14; 15; 16; 18; 20; 25; 30; 32; 36; 40; 45; 60;$
		$a = 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2;$ $b = 20; 25; 30; 32; 36; 40; 45; 60; 80; 100;$
12766.5–77	Лента плющенная	$a = 0,10; 0,15; 0,20; 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32; 0,35; 0,36; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90;$
		$b = 4; 6; 8$ и далее до 60 мм по ГОСТ 12766.2-77
По ГОСТ 12766.3–77 выпускается калиброванный прокат $d=8...10$ мм.		

П.4.1. Основные теплофизические характеристики
огнеупорных и теплоизоляционных материалов [2, 3, 10]

Наименование и марка материала	γ_k , кг/м ³	$t_{\text{МАКС}}$, ° С	λ , Вт/м·К	c_p , Дж/кг·К
Огнеупорные материалы				
Шамот класса А (ША)	2160	1450	$0,980+0,278 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот класса Б (ШБ)	1850	1400	$0,923+0,438 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ–1,3	1300	1400	$0,442+0,535 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ–1,0	1000	1300	$0,520+0,349 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ–0,9	900	1270	$0,400+0,383 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ–0,4	400	1150	$0,100+0,286 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамотно-тальковый легковес ШЛ–0,6	600	1200	$0,250+0,267 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Хромомагнезитовый кирпич ХМ	2800	1500	$2,600-0,750 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$447+0,61 \cdot t$
Муллитовый кирпич МЛО, МЛУ	2300	1500	$2,310-2,320 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Корунд К (алунд)	3600	1850	$12,20-0,860 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$630+0,42 \cdot t$
Корундовый легковес КЛ-1,3	1300	1500	$0,710-0,118 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$630+0,42 \cdot t$
Муллитокорундовый кирпич МКО, МКП	2400	1550	$1,570-0,200 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитовый легковес МЛЛ-1,3	1300	1500	$0,550-0,100 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,8	800	1300	$0,494-0,145 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,5	500	1300	$0,214+0,145 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Карборунд КА	2500	1450	$23,75-10,45 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$963+0,15 \cdot t$

Продолжение приложения П.4.1

Наименование и марка материала	γ_k , кг/м ³	$t_{\text{МАКС}}$, ° С	λ , Вт/м·К	c_p , Дж/кг·К
Теплоизоляционные материалы				
Диатомит обожжённый в порошке (засыпке)	650	800	$0,110+0,232 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-500	500	900	$0,105+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-600	600	900	$0,132+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-700	700	900	$0,159+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич пенодиатомитовый ПД-400	400	900	$0,077+0,314 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Перлит вспученный в порошке	200	900	$0,060+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$880+0,05 \cdot t$
Асбест листовой	1200	500	$0,157+0,221 \cdot 10^{-3} \cdot t$	835
Асбест распушенный А и АС	900	500	$0,163+0,174 \cdot 10^{-3} \cdot t$	835
Минеральная (шлаковая) вата марки 150	150	750	$0,059+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Минеральная (шлаковая) вата марки 200	200	750	$0,060+0,198 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Минеральная (шлаковая) вата марки 250	250	750	$0,060+0,198 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Вата каолиновая ВГВ-80	80	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Вата каолиновая ВГВ-200	200	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Рулонный каолиновый материал ВГР-150	150	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Керамоперлитные изделия КП-350	350	900	$0,087+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	920
Войлок углеграфитовый ВВПН-250	250	2000	0,2 (в вакууме)	835

Примечание: γ — кажущаяся плотность; $t_{\text{МАКС}}$ — предельная температура применения; λ — коэффициент теплопроводности; c_p — удельная теплоёмкость; t — средняя температура слоя материала футеровки, °С.

П.4.2. Средняя теплоёмкость простых газов, кДж/(м³·К) [2]

$T, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	1,3059	1,2987	1,2766	1,2992	1,5998	1,4943
100	1,3126	1,3004	1,2908	1,3017	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,3038	1,2971	1,3071	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3109	1,2992	1,3167	1,8627	1,5424
400	1,3775	1,3205	1,3021	1,3289	1,9297	1,5645
500	1,3980	1,3322	1,3050	1,3427	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3452	1,3080	1,3574	2,0411	1,6148
700	1,4345	1,3586	1,3121	1,3720	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3717	1,3168	1,3862	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3846	1,3226	1,3996	2,1692	1,6956
1000	1,4775	1,3971	1,3289	1,4126	2,2035	1,7229
1100	1,4892	1,4089	1,3360	1,4248	2,2349	1,7501
1200	1,5006	1,4202	1,3431	1,4361	2,2639	1,7769
1300	1,5106	1,4306	1,3511	1,4465	2,2898	1,8028
1400	1,5202	1,4407	1,3590	1,4566	2,3136	1,8280
1500	1,5294	1,4499	1,3674	1,4658	2,3354	1,8527

П.4.3. Физические свойства воздуха [2, 15]

T , °C	γ , кг/м ³	c_p , кДж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	a , 10 ⁻⁴ м ² /с	ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Pr
0	1,2930	1,2971	0,0243	0,188	13,23	0,705
100	0,9458	1,3004	0,0319	0,337	23,15	0,694
200	0,7457	1,3071	0,0387	0,514	34,85	0,689
300	0,6157	1,3172	0,0448	0,715	48,24	0,692
400	0,5242	1,3289	0,0505	0,930	62,95	0,697
500	0,4564	1,3427	0,0562	1,155	79,32	0,703
600	0,4041	1,3565	0,0615	1,384	96,75	0,708
700	0,3625	1,3708	0,0666	1,635	115,0	0,710
800	0,3287	1,3842	0,0720	1,885	135,5	0,714
900	0,3010	1,3976	0,0761	2,163	154,8	0,717
1000	0,2773	1,4098	0,0804	2,461	176,7	0,721
1100	0,2571	1,4215	0,0848	2,762	199,1	0,722
1200	0,2377	1,4328	0,0916	3,165	224,6	0,724
1300	0,2258	1,4453	0,0961	3,415	248,1	0,726
1400	0,2110	1,4529	0,0100	3,780	275,0	0,727

Примечание: γ — плотность; c_p — средняя теплоёмкость; λ — теплопроводность; a — температуропроводность; ν — кинематическая вязкость; Pr — число Прандтля.

П.4.4. Физические свойства продуктов сгорания [2, 11]

T , °C	γ , кг/м ³	c_p , кДж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	a , 10 ⁻⁴ м ² /с	ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Pr
0	1,295	1,359	0,0228	0,169	12,20	0,72
100	0,950	1,370	0,0313	0,308	21,54	0,69
200	0,748	1,381	0,0401	0,489	32,80	0,67
300	0,617	1,397	0,0484	0,698	45,41	0,65
400	0,525	1,415	0,0570	0,941	60,38	0,64
500	0,457	1,431	0,0656	1,213	76,30	0,63
600	0,405	1,448	0,0742	1,510	93,61	0,62
700	0,363	1,460	0,0827	1,843	112,1	0,61
800	0,329	1,472	0,0915	2,200	131,8	0,60
900	0,301	1,485	0,100	2,581	152,5	0,59
1000	0,275	1,498	0,109	3,014	174,3	0,58
1100	0,257	1,511	0,118	3,460	197,1	0,57
1200	0,240	1,523	0,126	3,918	221,0	0,56
1300	0,225	1,535	0,135	4,450	24,1	0,55
1400	0,212	1,548	0,144	5,010	270,5	0,54

Примечание: γ — плотность; c_p — средняя теплоёмкость; λ — теплопроводность; a — температуропроводность; ν — кинематическая вязкость; Pr — число Прандтля.

П4.5. Тепловые эффекты реакций горения газов $Q_{\text{ГОР}}$ [2]

Реакции	Молекулярная масса компонентов реакции	$Q_{\text{ГОР}}$, МДж		
		исходного газа		продуктов сгорания
		на 1 кг	на 1 м ³	на 1 м ³
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	28+16=44	10,10	12,63	12,63
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	2+16=18	119,1	10,79	10,79
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 =$ $=\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	16+64= =44+36	50,06	35,83	11,95
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 =$ $= 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	30+112= =88+64	47,53	63,79	12,76
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 =$ $= 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	44+160= =132+72	46,40	91,28	13,05
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 =$ $= 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	58+208= =176+90	45,77	118,67	13,19
$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 =$ $= 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	72+256= =220+108	45,40	146,19	13,29
$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 =$ $=2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	28+96= =88+36	47,28	59,06	14,76
$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5\text{O}_2 =$ $= 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	42+144= =132+54	45,82	86,01	14,34
$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 =$ $= \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	34+48= =64+18	15,23	23,17	11,59

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Библиографический список

1. СТО ЮУрГУ 04-2008. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И.Парубочая, Н.В.Сырейщикова, В.И.Гузеев, Л.В.Винокуров. – Челябинск, 2008. – 56 с.
2. Матрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Учебник. Т. 2./ С.Б. Матрюков— М.: Металлургия, 1986. — 272 с
3. Электротермическое оборудование: Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена — М.: Энергия, 1980. — 416 с.
4. Матрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей / С.Б. Матрюков— М.: Металлургия, 1972. —368 с
5. Арндарчук А.В.Общепромышленные электрические печи непрерывного действия / А.В.Арндарчук, Н.М. Катель, В.Я.Липов и др. — М.: Энергия, 1977. — 247 с.
6. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов: Учебное пособие / К.Н.Соколов — Киев–Донецк: Вища школа, 1984. — 328 с.
7. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Ч.1. Печи сопротивления: Учебник / А.Д.Свенчанский– М.: Энергия, 1975. — 384 с.
8. Тимошпольский В.И.Печи и сушила машиностроительного и металлургического производства / В.И.Тимошпольский, А.П.Несенчук, И.Н.Трусова и др.— М.: Теплотехника, 2008. – 240 с.
9. Корягин Ю.Д.Тепловые и электрические расчеты термических печей: Учебное пособие. – 2-е издание/ Ю.Д. Корягин.— Изд. ЮУрГУ, 2005. – 178 с.
- 10.Корягин Ю.Д. Тепловые расчеты термического оборудования и автоматическое регулирование пламенных печей: Учебное пособие /Ю.Д. КорягинС.И. Ильин С.И. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 102 с.
11. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И.Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368.с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
1. Общие сведения о курсовом проектировании	3
1.1. Содержание курсового проекта.....	3
1.2. Технологическая часть проекта.....	4
1.3. Выбор и описание оборудования.....	5
2. Расчетная часть проекта.....	6
2.1. Расчеты времени нагрева изделий при термической обработке.....	6
2.1.1. Теоретические основы нагрева металла в печах.....	6
2.1.2. Особенности расчета суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических и топливных печах.....	9
2.1.3. Определение времени нагрева изделий в термических печах с постоянной температурой.....	16
2.1.4. Определение времени нагрева изделий в печах периодического действия.....	18
2.1.5. Особенности расчета многозонных методических печей.....	22
3. Тепловой расчет термических печей.....	25
3.1. Методика составления теплового баланса.....	25
3.1.1. Приходные статьи.....	26
3.1.2. Расходные статьи.....	26
3.2. Расчет электрических нагревателей.....	31
3.2.1. Классификация, материалы и конструкции нагревателей.....	32
3.2.2. Расчет электрических металлических нагревателей.....	36
Приложения.....	48
Библиографический список.....	76

Учебное пособие

Юрий Дмитриевич Корягин

Проектирование термических подразделений.

Учебное пособие к курсовому проектированию.

Техн. редактор А.В.Миних

Издательский центр Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 29.09.1999. Подписано в печать .04.2014. Формат
60×94 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,57.
Тираж 30 экз. Заказ 1821. Цена 10 р. 80 к.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76

