

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ институт им.С.П.КОРОЛЕВА

Л.И.ЖЕМКОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания  
для курсового проектирования

Утверждены редакционным  
советом института 6 октября 1972 года

Куйбышев 1973

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Методические указания  
для курсового проектирования**

**Часть I**

**Редактор - В.Я.Резникова  
Техн.редактор - Н.М.Каленик  
Корректор - Л.В.Сидорова**

**Подписано в печать II/IV-73 г. Объем 3,2<sup>1</sup> п.л.**

**Тираж 500 экз. Цена 18 коп.**

**Куйбышевский авиационный институт им. С.П.Королева,  
г.Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.**

**Ротапринтный цех областной типографии им. Маяковского,  
г.Куйбышев, ул.Венцека, 60. Заказ № 1000**

## Г. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ ПРОЕКТА

В работе над курсовым проектом по печам студент должен закрепить знания, полученные в курсе лекций по теории теплообмена, и получить практический навык в расчете тепловых процессов, связанных с нагревом металла.

Проект должен содержать обоснованный выбор типа печи, подробный расчет процесса нагрева металла, определение всех составляющих теплового баланса, мощности печи, расчет электрических нагревателей, определение качественных показателей работы печи (коэффициент полезного действия печи, удельный расход электроэнергии).

Одновременно с чисто теплотехническими расчетами должно быть уделено необходимое внимание выбору способа регулирования мощности (температуры) печи и оформлению его в виде конкретной, реальной схемы автоматического регулирования печи. Также должен быть обоснованно выбран способ загрузки, выгрузки и транспортирования деталей в печи.

Часть проекта или отдельно поставленная задача могут быть предложены в качестве спецтемы проекта. Законченный проект оформляется в виде пояснительной записки и чертежей.

Пояснительная записка должна содержать в среднем 20-25 страниц рукописного текста с необходимыми чертежами или графиками (по согласованию с консультантом) на бумаге формата II (машиннописный лист) со стандартной обложкой. Бланк задания на проект помещают в начале записки.

Чертежи к проекту оформляются в среднем на двух листах формата 24 (A1). Объем чертежной работы согласовывается с консультантом конкретно по каждому заданию.

## II. РАСЧЕТ ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

### I ЭСКИЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧИ

В связи с тем, что при проектировании печи ряд параметров выбирается произвольно и сам процесс нагрева может быть проведен по-разному, обычно нельзя определить какая печь наилучшим образом удовлетворяет условиям, содержащимся в задании на проект. Возможность выбора печей, удовлетворяющих поставленным условиям, приводит к необходимости проведения предварительного исследования, которое можно назвать эскизным проектированием.

В ходе эскизного проектирования выделяется группа печей с такой конструкцией, которая в принципе могла бы служить прототипом проектируемой. Критический анализ этих вариантов должен выявить недостатки и достоинства их и ограничить число возможных конструктивных решений.

Основные требования, предъявляемые к конструкциям печей, следующие:

проведение нагрева изделий с наибольшей скоростью и с высоким качеством;

механизация загрузки и выгрузки изделий;

автоматизация печи.

Главное требование состоит, очевидно, в том, чтобы обеспечить наилучший теплообмен нагревателями и изделиями (в среднетемпературных печах) или циркулирующим воздухом и изделиями (в низкотемпературных печах для нагрева легких сплавов). Помимо высокой интенсивности теплообмена для печей периодического действия необходимым требованием является однотипность процесса нагрева для всех деталей в садке.

Учитывая перечисленные требования, можно провести анализ пригодности печи того или иного типа для нагрева в соответствии с заданием и при окончательном выборе конструкции печи нужно учесть также все остальные требования и условия, содержащиеся в задании на проект (например, обеспечение хороших санитарно-гигиенических условий для обслуживающего персонала, хорошая компоновка печи с механическим оборудованием и т.д.)

Для выбранного типа печи необходимо определить основные

габаритные размеры. При решении этой задачи нужно проверить различные способы расположения нагреваемых деталей. Следует учитывать в первую очередь характер теплообмена для каждого варианта. С целью лучшего теплообмена в среднетемпературных печах периодического действия можно рекомендовать так располагать детали, чтобы они не экранировали друг друга и в равной степени облучались нагревателями и футеровкой. Детали с развитой поверхностью (типа листов или пластин) желательно располагать против излучающих поверхностей печной камеры (свод, боковые стены). По возможности нужно избегать загрузки деталей в виде стопы или олон, так как это может привести к неравномерному их нагреву. В таких случаях приходится снижать скорость нагрева, чтобы выравнять перепады температуры в садке.

В печах с циркуляцией воздуха следует учитывать особенности конвективного теплообмена. Например, длинномерные детали желательно размещать нормально к потоку воздуха и на некотором расстоянии друг от друга, так как при этом больше интенсивность теплообмена и лучше осуществляется циркуляция воздуха в зазорах.

При определении размеров рабочего пространства печи можно сделать различные варианты более наглядными, если детали изготовить в определенном масштабе из бумаги или картона и разместить их на миллиметровке. Таким способом легко можно определить площадь печи и ее основные размеры. Нужно отметить, что иногда чисто логическое решение задачи о выборе типа печи и о размерах ее рабочего пространства не удается получить, и тогда эскизное проектирование продолжают, проверяя расчетами нагрева металла преимуществ различных способов размещения заготовок.

В качестве примера можно привести расчет нагрева металла в виде тонких листов. Нагрев возможен в виде стопы, содержащей много листов (например, вся часовую производительность печи по заданию) или в виде полистного нагрева, где листы нагреваются по одному в печи. Очевидно, что здесь без расчета процесса нагрева металла нельзя отдать предпочтение одному из вариантов.

## 2. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

После окончательного выбора типа печи и определения ее габаритных размеров необходимо выбрать способ нагрева металла и установить условия теплообмена. Нагрев в печах периодического действия можно осуществить разными способами.

стороны рассмотренных процессов нагрева и в значительной мере компенсировать их недостатки. Так, в первом этапе, можно использовать полную мощность печи и произвести быстрый нагрев, а во втором - осуществить точный нагрев изделия до заданной температуры и уменьшить перепад температуры.

Комбинированный способ нагрева показан на рис.3, из которого видно, что характер нагрева и его качество определяется прежде всего значением температуры печи. При проектировании эта величина обычно выбирается в зависимости от температуры нагрева металла и типа печи. В средне- и высокотемпературных печах можно принимать значения  $T_{печи}$  на  $50 + 150^{\circ}\text{C}$  выше температуры нагрева металла  $T''$  (имеется в виду температура поверхности металла в конце нагрева). Большие значения  $T_{печи}$  можно принимать для интенсификации нагрева, если свойства материала и конструкция детали позволяют провести ускоренный нагрев.

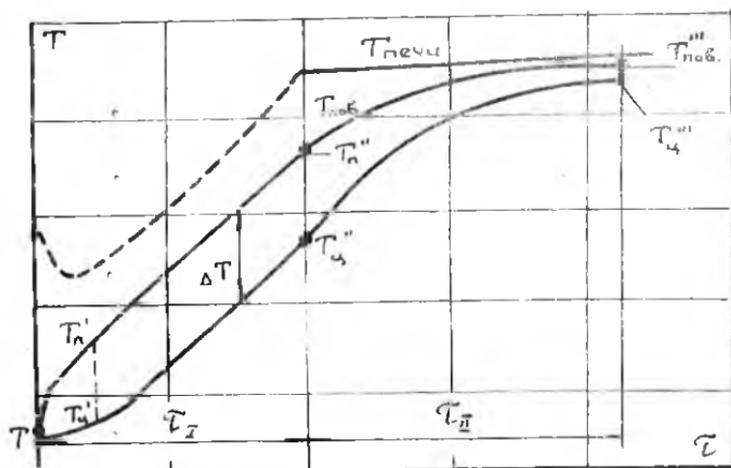


Рис.3. Нагрев "массивного" тела в печи периодического действия

Меньшие значения нужно брать в случаях, когда в конце нагрева требуется получить в детали равномерное температурное поле или когда необходимо избежать возникновения в детали термических напряжений.

При проектировании нагрева в два этапа нужно правильно

выбрать в первом этапе температуру до которой изделия будут нагреваться. От этого зависит степень использования мощности печи, ее к.п.д. и общее время нагрева садка. Значение температуры изделия в конце первого этапа определяется формулой  $T_{нов}'' = (0,8 + 0,85) T_{нов}''$  - для среднетемпературных печей;  $T_{нов}'' = (0,9 + 0,95) T_{нов}''$  - для низкотемпературных печей с циркуляцией атмосферы.

Все изделия в процессе их нагрева можно условно разделить на две группы.

К первой группе относят те случаи, когда в изделиях можно пренебречь перепадом температуры по сечению. Это так называемые термически "тонкие" тела. Ко второй группе относят случаи, когда в изделиях образуются значительные перепады температуры, пренебречь которыми нельзя и их необходимо рассчитать. Это так называемые "массивные" тела.

Деление на "тонкие" и "массивные" тела производится по величине критерия Био в каждом конкретном процессе нагрева. При  $Bi < 0,25$  можно пренебречь внутренним перепадом температуры ("тонкое" тело), а при  $Bi > 0,5$  - нужно учитывать величину перепада температуры ("массивное" тело).

Хотя условность такого деления очевидна, можно на его основе создать удобные инженерные методы расчета нагрева тел. Поскольку выбором  $T_{печи}$  по-сути определены условия теплообмена для металла в печи, следующим этапом в расчете нагрева является определение критерия Био или конкретно - значения перепада температуры в изделии.

Необходимо отметить, что при расчетах лучше произвести оценку характера нагрева непосредственно по величине теплового потока, поступающего в нагреваемое тело, или по критерию Био. Дело в том, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{обж}$ , который определяет интенсивность теплообмена, или полностью (средне- и высокотемпературные печи), или в значительной степени определяется величиной  $\alpha_{луч}$ . Поведение  $\alpha_{луч}$  не соответствует физике процесса теплообмена, в чем легко убедиться, вычисляя его в различные моменты нагрева. Эта величина непрерывно растет, особенно во втором этапе нагрева (при  $T_{печи} = const$ ), и в то время как температурное поле в теле выравнивается вследствие уменьшения теплового потока теплообмена, формальное вычисление критерия Био приводит к абсурду - тело становится "массивным". По указанной причине следует считать оценку равномерности температурного поля по критерию Био весьма

приближенной, особенно во втором этапе нагрева.

Расчет нагрева следует вести следующим образом. По значениям температуры печи и поверхности металла на стыке двух эталон (обе температуры выбраны) определяется значение теплового потока первого этапа. По закону Стефана-Больцмана

$$q_I = C_{пр} \left[ \left( \frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \text{час}} \cdot \frac{\delta \text{м}}{\text{м}^2}, \quad (1)$$

где  $C_{пр}$  - приведенный коэффициент излучения для системы "печь-изделие"

$$C_{пр} = \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_{изд}} + \frac{F_{изд}}{F_{печи}} \left( \frac{1}{\epsilon_{печи}} - 1 \right)} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \text{час} \cdot \text{К}}, \quad (2)$$

где  $C_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  или  $4,96 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час} \cdot \text{К}^4}$ .

$\epsilon_{изд}, \epsilon_{печи}$  - соответственно степень черноты изделия и стен печи;

$F_{изд}, F_{печи}$  - соответственно поверхности лучистого теплообмена изделия в печи.

Значения  $\epsilon_{изд}$  и  $\epsilon_{печи}$  определяются из справочных данных, например, из [1], а отношение  $\frac{F_{изд}}{F_{печи}}$  может быть ориентировочно оценено после эскизного проектирования. Формула для  $C_{пр}$  допускает упрощения.

В случае  $F_{изд} \ll F_{печи}$  -  $C_{пр} \approx C_0 \epsilon_{изд}$ ;

в случае  $F_{изд} \approx F_{печи}$  -  $C_{пр} = \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_{изд}} + \frac{1}{\epsilon_{печи}} - 1}$ .

По величине постоянного теплового потока  $q_I$  необходимо определить перепад температуры по сечению детали. Этот перепад после окончания иррегулярного режима в начале нагрева становится постоянным (если теплофизические характеристики материала постоянны), и может быть вычислен:

для симметричного нагрева деталей типа пластины толщиной  $2S$  или одностороннего нагрева пластины толщиной  $S$

$$\Delta T = \frac{q_I S}{2\lambda};$$

для симметричного нагрева деталей типа цилиндра с радиусом основания  $R$

$$\Delta T = \frac{q_I R}{2\lambda}.$$

Определив  $\Delta T$ , необходимо сделать вывод о допустимости такого перепада температур при нагреве. Если перепад мал, то нужно

исследовать, какое значение перепада допустимо, с тем, чтобы интенсифицировать нагрев в первом этапе.

Максимальное значение перепада температуры по сечению детали в первом этапе в задании на проект задается редко, лишь в особых случаях, поэтому необходимо принять самостоятельное решение. Нужно при этом помнить, что сокращая время первого этапа, в то же время возможно придется увеличить значительно время второго этапа, где возникает задача выровнять большой перепад температур. В некоторых проектах в качестве спейтмена может быть поставлена минимизация общего времени нагрева путем просчета различных вариантов — при разных температурах печи, разных соотношениях времени нагрева в первом и втором этапах, разных нормах перепада температуры в изделии.

В целом ряде случаев, получив в первом этапе малый перепад температуры, можно в дальнейшем вести расчет как для "тонкого" тела. Это относится, в основном, к нагреву теплопроводных металлов (сплавы алюминия, меди). Если перепад температур получился слишком большим, то причиной этого является слишком большая выбранная температура печи. Ещё нужно выбрать иной, с тем, чтобы при расчете получить  $\Delta T$  приемлемой величины.

Время нагрева до выбранной в расчете температуры поверхности изделия в конце первого этапа определяется различным образом в зависимости от "массивности" тела.

В случае "тонкого" тела задача упрощается, так как достаточно рассмотреть баланс тепла в первом этапе

$$q_1 F_{\text{изд}} \tau_I = C_{\text{изд}} C_{\text{изд}} (T_{\text{изд}}'' - T_{\text{изд}}') \text{ кдж}, \quad (3)$$

здесь геометрия тела роли не играет. Отсюда

$$\tau_I = \frac{C_{\text{изд}} C_{\text{изд}} \text{ ср.}}{F_{\text{изд}} \cdot q_1} (T_{\text{изд}}'' - T_{\text{изд}}') \text{ час.} \quad (4)$$

Для "массивного" тела нагрев постоянным потоком тепла возможно рассчитать, основываясь на решении уравнения теплопроводности при граничных условиях второго рода [1]

$$T(x, \tau) = \frac{q_1 S}{2\lambda} \left[ \frac{2\alpha\tau}{S^2} + \left(\frac{x}{S}\right)^2 \frac{1}{3} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(-1)^k}{K} \cos \pi k \frac{x}{S} \exp(-\pi^2 k^2 \frac{\alpha\tau}{S^2}) \right],$$

где  $K=1, 2, 3$  (решение приводится для пластины толщиной  $S$ ).

Для применения этого решения необходимо использовать

вычислительную технику. Поэтому в инженерных расчетах нагрева получили распространение простые расчетные формулы, обоснованные анализом общего решения уравнения теплопроводности. Анализ показывает, что независимо от размеров и геометрии тел, можно выделить два качественно различных периода процесса нагрева - начальный или иррегулярный период, когда в теле происходит перестройка исходного температурного поля; и период стабилизированного или регулярного режима, когда температура во всех точках тела изменяется во времени по одному и тому же закону.

В регулярном режиме при  $q = const$  и  $c = const$  в "массивном" теле температура в любой точке изменяется по линейному закону. Несколько искусственное разделение единого процесса нагрева на два периода приводит к значительному упрощению расчетных формул. Так было обнаружено, что длительность иррегулярного режима соответствует значению критерия Фурье  $F_0 = 0,25 \pm 0,3$ .

Отсюда время иррегулярного режима

$$\text{для деталей типа пластины} \quad - \tau' \cong 0,3 \frac{S^2}{a} ; \quad (5)$$

$$\text{для деталей типа цилиндра} \quad - \tau' \cong 0,25 \frac{R^2}{a} ; \quad (6)$$

где  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$  - коэффициент температуропроводности нагреваемого металла.

Начиная с момента  $\tau'$ , можно считать, что в изделии устанавливается постоянный перепад температуры и температура во всех точках изменяется по линейному закону. Приблизительно можно считать, что в начале регулярного режима температура поверхности детали

$$\text{для пластины} \quad - T_{\text{пов}}'' = T_0 + 1,27 \Delta T ; \quad (7)$$

$$\text{для цилиндра} \quad - T_{\text{пов}}'' = T_0 + 1,50 \Delta T. \quad (8)$$

Температура в центре меньше на величину  $\Delta T$ . Время нагрева в регулярном периоде [7] :

$$\text{для пластины} \quad - \tau'' = \frac{c \rho S}{q_1} (T_{\text{пов}}'' - T'_{\text{пов}}); \quad (9)$$

$$\text{для цилиндра} \quad - \tau'' = \frac{c \rho R}{2 q_1} (T_{\text{пов}}'' - T'_{\text{пов}}). \quad (10).$$

В формулах для  $\tau''$  можно использовать разность температур для любой фиксированной точки ( $T''_y - T'_y, T'' - T', \dots$  и т.д.), так как характер изменения температуры во времени во всех точках тела одинаков.

Таким образом, время нагрева изделий в первом этапе

для пластины  $-\tau_I = 0,3 \frac{S^2}{a} + \frac{C_D S}{q_I} (T''_{пов} - T'_{пов});$  (II)

для цилиндра  $-\tau_I = 0,25 \frac{R^2}{a} + \frac{C_D R}{2 \cdot q_I} (T'_{пов} - T''_{пов}).$  (I2).

К концу первого этапа "массивное" изделие имеет на поверхности температуру  $T''_{пов}$ , в центре — на  $\Delta T$  меньше, а средняя по объёму температура [7]

для пластины  $-\bar{T}'' \approx T''_{пов} - 0,7 \Delta T;$  (I3)

для цилиндра  $-\bar{T}'' \approx T''_{пов} - 0,6 \Delta T.$  (I4).

Значения температуры  $T''_{пов}$ ,  $T_c''$ , величины  $\Delta T$  и  $\bar{T}''$  являются необходимыми для расчета второго этапа нагрева.

Второй этап нагрева идет при постоянной температуре печи. Тепловой поток, поступающий к нагреваемым деталям, непрерывно уменьшается. Вследствие этого возрастает роль теплопроводности материала и температурное поле выравнивается в процессе нагрева. В этом одна из главных целей проведения второго этапа нагрева. Другая цель — получение заданной температуры нагрева. Если нагревают "тонкое" тело, то время нагрева во втором этапе определяется из решения уравнения теплового баланса

$$C_{изд} \cdot C_{изд.ср} \cdot dT = C_{пр} F_{изд} \left[ \left( \frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] dt. \quad (I5)$$

Решив это уравнение, получим

$$\tau_{II} = \frac{C_{изд} \cdot C_{изд.ср}}{F_{изд} \cdot C_{пр}} \cdot \frac{100}{\left( \frac{T_{печи}}{100} \right)^3} \left[ \Psi \left( \frac{T_{изд}''}{T_{печи}} \right) - \Psi \left( \frac{T_{изд}'''}{T_{печи}} \right) \right], \quad (I6)$$

где 
$$\Psi \left( \frac{T_{изд}'''}{T_{печи}} \right) = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T_{печи}'''}{T_{печи}}}{1 - \frac{T_{печи}'''}{T_{печи}}} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{T_{печи}'''}{T_{печи}} \quad (I7)$$

(аналогично для  $\Psi \left( \frac{T_{изд}''}{T_{печи}} \right)$ ).

Функции  $\Psi \left( \frac{T_{изд}''}{T_{печи}} \right)$  и  $\Psi \left( \frac{T_{изд}'''}{T_{печи}} \right)$  табулированы [7].

В случае нагрева "массивного" тела точное аналитическое определение температурного поля в теле или времени нагрева невозможно. Задача о нагреве тела переменным лучистым потоком является нелинейной задачей, решение которой в общем виде еще не получено. Поэтому второй этап нагрева "массивного" тела можно рассчитать лишь приближенно. Для этой цели перепад температур во втором этапе разбивается на несколько интервалов. Для каждого интервала (рис.4) условно принимают, что он идет при постоянном коэффициенте теплоотдачи, в качестве которого принимается среднее зна-

чение коэффициента теплоотдачи излучением (полусумма коэффициентов теплоотдачи на концах рассчитываемого интервала температур).

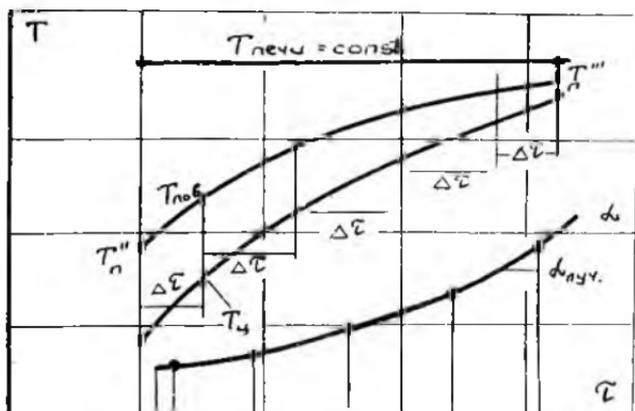


Рис.4. К расчету лучистого нагрева массивного тела во II этапе по участкам

Для каждого интервала можно применить решение уравнения теплопроводности Фурье при граничных условиях III рода. Расчет ведут, используя графики Д.В. Будрина [1,5] .

Предварительно вычисляют значения критериев  $Bi = \frac{\alpha \ell}{\lambda}$ ,  $Fo = \frac{\alpha \tau}{\ell^2}$ ,  $\theta_{пов.центр} = \frac{T_{печу} - T_{пов.центр}}{T_{печу} - T_{ср}}$ .

В критерий Био подставляется среднее значение коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\alpha_{луч}^{пов} + \alpha_{луч}^{центр}}{2} \quad (18)$$

В значение  $\theta$  необходимо подставить среднее значение температуры по сечению тела в начале рассматриваемого интервала  $T_{ср}^{пов}$ . В значения критериев Био и Фурье подставляют в качестве характерного размера  $\ell$  радиус цилиндра или толщину пластины.

Расчет начинают с первого интервала, в начале которого температуры тела равны  $T_{пов}''$  и  $T_{у}''$ . Используя график Будрина для поверхности тела, по известным величинам  $Bi$  и  $\theta_{пов}$  для данного интервала, определяют его длительность - значение  $Fo$ . По графику для центра находят по величине  $Bi$  и  $Fo$ , значение безразмерной

температуры в центре изделия. В результате получаем время нагрева изделия в данном интервале и температуры на поверхности и в центре. Аналогично проводится расчет и для последующих интервалов. В итоге получается общее время нагрева во втором этапе и перепад температур в изделии в конце нагрева. Если перепад температур получается больше заданного предельного значения, можно рекомендовать продолжить расчет по этой схеме. При этом будут возрастать температуры на поверхности и в центре, но рост температуры в центре идет с большей скоростью, чем на поверхности и через некоторое время может произойти выравнивание температуры. Если же этот процесс окажется слишком растянутым во времени или температура поверхности значительно превысит заданную, то лучше провести расчет нагрева заново, снизив температуру печи. Для оценки времени нагрева можно не разделять второй этап на интервалы, а осреднить  $\alpha_{луч}$  для всего этапа [7], т.е.

$$\bar{\alpha}_{луч} = \frac{\alpha_{луч} + \alpha_{луч}}{2}.$$

Однако такой расчет может дать ошибку до 50% и больше. Для трудоемких расчетов, подобных описанным, можно использовать ЭЦМ типа "Проминь-М", "Мир-1", техника работы на которых сравнительно легко осваивается [11]. С помощью вычислительных средств можно определить разнообразные варианты нагрева, проанализировать влияние на него различных факторов, учесть в расчетах переменность теплофизических характеристик нагреваемого материала. Наконец, при помощи ЭЦМ можно провести расчеты тех случаев нагрева изделий, для которых еще не создана методика расчета, так как аналитические решения соответствующей задачи теплопроводности не получены. Например, задачу о нагреве "массивного" тела переменным лучистым потоком можно рассчитать с достаточной точностью, преобразовав исходную систему дифференциальных уравнений в конечно-разностные соотношения. При этом получается кривая нагрева в любой точке тела для всего процесса, без деления на "нерегулярный" и "регулярный" режимы.

#### Контрольные вопросы

1. Какие соображения положены в основу выбора способа нагрева металла?
2. Какими механизмами осуществляется теплообмен при нагреве изделий в проектируемой печи?

3. Какие меры приняты или возможны для интенсификации теплообмена в проектируемой печи?
4. Какие основные факторы, определяющие время нагрева изделий?
5. Чем оценивается качество нагрева изделий?
6. Какими расчетными методами можно определить неравномерность температурного поля в изделии в различные этапы нагрева?
7. В чем сущность применяемых методов выравнивания температурного поля в изделиях?
8. В чем состоит физический смысл иррегулярного и регулярного режимов при нагреве изделий?
9. В чем практическая ценность такого разделения процесса нагрева?

### 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ

Тепловой баланс составляется на один цикл работы печи. Время цикла состоит из времени загрузки деталей, времени нагрева, выдержки (если она необходима), времени выгрузки и простоя. В ряде процессов изделия остывают в печи до определенной температуры и тогда время остывания также входит во время цикла. Выделяющееся в нагревателях за один цикл тепло расходуется на нагрев металла (полезное тепло), на нагрев вспомогательных устройств и деталей (вспомогательное тепло), и уходит с тепловыми потерями различного вида.

Полезное тепло определяется следующим образом:

$$Q_{\text{полезн}} = C_{\text{изд}} G (T_{\text{изд}}^{\text{м}} - T_{\text{изд}}^{\text{н}}) \text{ [кдж]}, \text{ [квт час]}, \quad (19)$$

где  $C_{\text{изд}}$  - теплоёмкость металла, средняя в интервале температур

$$T_{\text{изд}}^{\text{м}} - T_{\text{изд}}^{\text{н}};$$

$G$  - количество металла, нагреваемого за один цикл.

Вспомогательное тепло - это тепло, затраченное на нагрев поддонов, коробок, противней, подкладок и др. деталей или устройств, которые нагреваются вместе с изделиями. Для определения  $Q_{\text{вспом}}$  необходимо знать вес этих устройств и температуру, до которой они нагреваются в каждом цикле.

В большинстве случаев можно принять, что температура нагрева вспомогательных деталей равна температуре нагрева изделий.

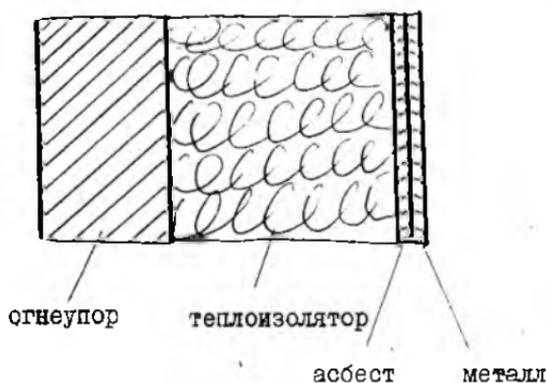
Тогда затраты тепла на вспомогательные устройства

$$Q_{вспом} = C_{всп} G_{всп} (T_{всп}^{м} - T_{всп}), \quad (20)$$

где  $T_{всп}^{м}$  — определяется из условий остывания вспомогательных деталей.

Тепловые потери складываются из потерь через ограждение печи (стены, свод, под); излучение через открытые двери, люки, щели; через так называемые тепловые "короткие замыкания"; потери при утечке нагретого воздуха или при подсосе холодного воздуха в печь; потери тепла с водой, охлаждающей детали, и тепла, аккумулированного печью, при остывании.

Перечисленные виды потерь вызваны разными причинами и величина их может изменяться в различные моменты цикла. Некоторые виды действуют лишь в определенных этапах цикла, например, потери, связанные с остыванием печи. Потери через стены определяют, пользуясь эскизом или чертежами печи. Обычно стена среднетемпературной печи состоит из слоя огнеупора (футеровка) толщиной от 100 до 250 мм, слоя теплоизоляционного материала толщиной 150-300 мм и металлического кожуха толщиной 2-5 мм. Между теплоизоляцией и кожухом в ряде случаев помещают прокладку из листового асбеста толщиной 5-15 мм (Рис.5).



В высокотемпературных печах конструкция стены часто отличается тем, что футеровку делают двухслойной и обращенный в печь слой выполняется из высокоогнеупорных материалов.

Рис.5. Типовая конструкция стены печи  
( К расчету теплового баланса печи )

Стены низкотемпературных печей обычно не требуют огнеупорной кладки и состоят лишь из слоя теплоизолятора между металлическими стенками. Очень важно рационально выбрать материалы для стен. Необходимо учесть следующее: соответствие огнеупорности ма-

бочим температурам печи, характер воздействия на огнеупор внутрипечной атмосферы, достаточна ли термостойкость выбираемого огнеупора для данного графика работы печи, возможно ли легко осуществлять крепление нагревателей на стенах из выбираемого огнеупора, достаточна ли прочность материала, выбираемого для пода и т.д. Теплоизоляция также должна удовлетворять ряду требований. Она прежде всего должна иметь возможно малый коэффициент теплопроводности. Помимо этого, должна длительно работать при температурах проектируемой стены (наиболее высокая температура - на стыке с огнеупором), должна быть химически инертной, негигроскопичной, не выделять вредных газов, должна быть технологичной при теплоизоляционных работах и т.д.

После разработки конструкции стен, свода и пода печи, определения их конфигурации и толщин огнеупора и теплоизоляции производят расчет тепловых потерь. При этом, если толщины огнеупора и изоляции одинакова на стенах, своде и полу можно взять общую поверхность печи и получить суммарную величину потерь через стены. Небольшие отличия в интенсивности теплообмена с окружающей средой горизонтальных и вертикальных поверхностей можно не учитывать. Если же конструктивно некоторые элементы ограждения печи значительно отличаются (например, по толщине огнеупора или теплоизолятора или по геометрии), то каждый участок стены, имеющий свои характерные особенности, рассчитывается отдельно, затем тепловые потери отдельных участков складывают. Для определения величины теплового потока через стенку используется соотношение типа закона Ньютона

$$Q_{стен} = K (T_{печи} - T_{в}) \cdot F_{расч}, \quad (21)$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи;

$F_{расч}$  - расчетная величина поверхности теплообмена;

$T_{в}$  - температура воздуха в окружающей атмосфере.

Для упрощения вычислений принято, что температура футеровки равна температуре печи. Тогда коэффициент теплопередачи можно вычислить по соотношению (для плоской стенки)

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \text{час}}, \quad (22)$$

где  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  - суммарное термическое сопротивление слоев стенки печи;

$\alpha_B$  - коэффициент теплоотдачи от стены к окружающему воздуху (имеется в виду суммарный коэффициент теплообмена при конвекции и при излучении).

Для единообразия в расчетах потерь для стен разной геометрии (плоской, цилиндрической, сферической) в формулу (21) введена расчетная поверхность теплообмена  $F_{расч}$ , применение которой позволяет сохранить форму записи для плоской стенки при разной геометрии. Например, если стенка плоская, но поверхности ее (со стороны печного пространства и окружающей среды) различны, то можно принять (для стационарного процесса)

$$F_{расч} = \frac{F_{внутр} + F_{внешн}}{2} \quad \text{м}^2; \quad (23)$$

для цилиндрической стенки

$$F_{расч} = \frac{F_2 - F_1}{\ln \frac{F_2}{F_1}} \quad \text{м}^2, \quad (24)$$

где  $F_2$  - наружная поверхность;

для сферической стенки

$$F_{расч} = \sqrt{F_1 \cdot F_2} \cdot \text{м}^2. \quad (25)$$

При определении  $Q_{стен}$  величина  $\alpha_B$  может быть принята  $40 + 50 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}} \right]$ , что соответствует разности температур между стеной и окружающей средой в  $50 + 60^\circ\text{С}$ . Значения теплопроводности, входящие в выражение для коэффициента теплопередачи, необходимо вычислять с учетом зависимости этих величин от температуры. Обычно эти величины вычисляют по средней температуре для каждого слоя. Так как температура на стыке слоев не известна, ее выбирают. Затем вычисляют  $Q_{стен}$  и проверяют величину температуры на стыке слоев огнеупора и теплоизоляции. Вычисления повторяют, принимая новые значения этой температуры, пока при проверке отклонение от выбранного значения будет не более 2-5%.

Тепловые потери излучением имеют значительную величину тогда, когда при работе печи в течение длительного времени бывает открыты дверцы, люки, окна для кантовки металла и т.д. Например, при работе кузнечных печей дверцы практически не закрываются, так как детали непрерывно одна за другой идут из печи на обработку. Потери излучением могут быть значительными и при простое печи при выгрузке или под погрузкой (например, печь с выкатным подом может быть открыта в течение длительного времени и излучает в

открытый проем своей внутренней поверхностью). Тепловые потери излучением определяют по закону Стефана-Больцмана

$$Q_{\text{луч}} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_6}{100} \right)^4 \right] F_{\text{отв}} \cdot \Psi \quad \frac{\text{кДж}}{\text{час}}, \quad (26)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты отверстия (может быть принята равной степени черноты внутренней поверхности стен печи),

$\Psi$  - коэффициент диафрагмирования отверстия, учитывающий соотношение глубины и диаметра излучающего отверстия или проема в стене. Эта величина определяется по графикам [7],

$F_{\text{отв}}$  - площадь окна или отверстия (рис.6).

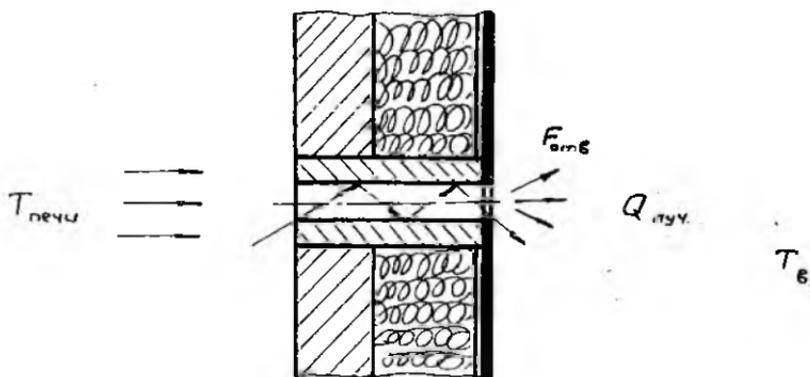


Рис.6. К расчету потерь тепла излучением через дыки, окна

Особый вид представляют потери через так называемые "тепловые короткие замыкания", т.е. через металлические детали, пронизывающие футеровку печи. Это токоподводящие стержни нагревателей, металлические трубки термопар, валы вентиляторов, работающих внутри печи, элементы крепления стен. Их проводимость во много раз превышает проводимость участка стены печи такого же поперечного сечения, чем и объясняется название "тепловое короткое замыкание". Для вычисления потерь тепла через эти элементы принимают для простоты, что перепад температуры на их концах равен  $T_{\text{печи}} - T_{\text{нар}}$  и затем по закону Фурье

$$Q_{\text{ткз}} = \lambda_m \frac{T_{\text{печи}} - T_{\text{нар}}}{\ell} S \quad \frac{\text{кДж}}{\text{час}} \quad (27)$$

Наиболее трудно, обычно, определить геометрические характеристики — длину  $l$  и поперечное сечение  $S$  этих элементов. Необходимо иметь детально разработанный чертеж печи.

Однако в большинстве случаев масштаб чертежей и степень их детализованности не позволяют рассмотреть отдельно каждый элемент. В этом случае величину потерь через тепловые короткие замыкания учитывают, увеличивая на 15–20% суммарные потери печи. При этом, однако, в пояснительной записке нужно указать роль тепловых коротких замыканий и где конкретно в проектируемой печи они возможны. Трудно определить потери тепла с уходящим из печи горячим воздухом (или другим газом) и потери от подсоса холодного воздуха извне, причиной которых является разность давлений в печи и в атмосфере. Места утечек и перепады давлений обычно трудно учесть расчетом. Поэтому не рекомендуется пользоваться для подсчета таких потерь формулами, которые приводятся в некоторых литературных источниках, так как они носят сугубо эмпирический характер.

Эти потери лучше учесть увеличением общих потерь печи на 2–5%. В ряде случаев цикл печи периодического действия содержит длительный период остывания. Печь остывает или с металлом или без него. В первом случае это вызвано технологией, а во втором — это результат недостаточно рационально организованной работы.

В обоих случаях в балансе тепла необходимо учесть потери тепла, аккумулированного печью. Если охлаждение металла в печи требуется по технологии обработки изделий, то обычно задается температура, до которой металл должен остывать. Расчет в этом случае состоит в определении времени остывания. В конце периода остывания определяют температурное поле кладки печи и по разности тепло-содержаний в начале охлаждения и в конце находят количество потерянной теплоты. Задача вычисления времени остывания для аналитического решения довольно сложная и поэтому можно рекомендовать приближенный расчет, основанный на методе конечных разностей [1, 5, 7].

Если печь остывает так долго, что ее температура становится близка к температуре окружающего воздуха, потери аккумулированного тепла вычисляются как разности теплосодержаний всех элементов печи в начале и в конце остывания. При этом начальное теплосодержание берут при средней температуре каждого слоя кладки в стационарном состоянии, а конечное теплосодержание вычисляют по температуре окружающего воздуха.

Потери аккумулированного тепла в балансе печи могут быть значительными, поэтому при выборе конструкции и эскизном проектировании необходимо учесть характер работы печи с тем, чтобы уменьшить эти потери. Для печей с глубоким охлаждением можно рекомендовать облегченную футеровку и теплоизоляцию, в ряде случаев — устройства для ускорения остывания металла в печи (в пределах допустимых по технологии скоростей). В этих случаях может дать значительный эффект применение экранной изоляции.

Указанные меры приводят к увеличенным потерям через стены печи, но за счет сокращения времени остывания и уменьшения величины потерь аккумулированного тепла коэффициент полезного действия сохраняет достаточно высокую величину. После вычисления потерь всех видов можно получить общий расход тепла за один цикл. Представляет значительный интерес для анализа работы печи построить график расхода тепла за время цикла (рис. 7).

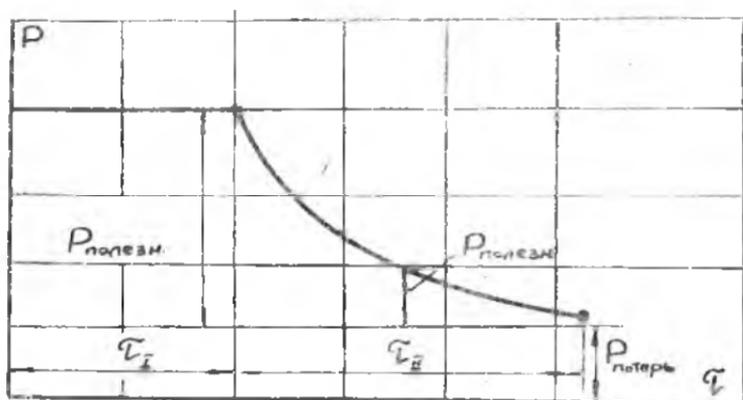


Рис. 7. Соотношение полезной мощности и мощности потерь в печи периодического действия за время нагрева

Этот график позволяет наглядно оценить роль отдельных видов потерь в различные моменты работы печи и правильно подойти к выбору мощности печи. Мощность должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить работу печи в любой момент цикла, т.е. по максимальному расходу тепла. Таким периодом является первый период нагрева, и, следовательно,

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_T}{\tau_T} \quad \text{квт} , \quad (28)$$

где  $Q_T$  - суммарный расход энергии в первом этапе;

$K = I, I + I, 3$  - коэффициент запаса, учитывающий старение теплоизоляции, падение мощности электронагревателей вследствие окисления, возможность работы на пониженном напряжении, необходимость обеспечения нагрева в некоторых случаях при перегрузке печи.

Тепловой к.п.д. печи

$$\eta_T = \frac{Q_{\text{полезн}}}{Q_{\text{цикла}}} \quad (29)$$

Важным показателем работы печи является удельный расход электроэнергии на 1 кг. (1 шт., 1 тонну) нагреваемых изделий

$$A = \frac{Q_{\text{цикла}}}{G \cdot T_{\text{цикла}}} , \quad (30)$$

где  $G$  - производительность печи  $\frac{\text{кг}}{\text{час}} ; \frac{\text{шт}}{\text{час}} ; \frac{\text{тонн}}{\text{час}}$

#### Контрольные вопросы

1. Каковы основные составляющие теплового баланса печи?
2. В чем отличие теплового баланса печи периодического действия от теплового баланса методической печи?
3. Как влияет структура и характер цикла работы печи периодического действия на ее коэффициент полезного действия?
4. Каково влияние отдельных составляющих теплового баланса печи на к.п.д.?
5. Какие меры могут быть использованы для повышения к.п.д. печи?
6. Какие из этих мер нашли применение в проектируемой печи?
7. Какие теплофизические характеристики имеют материалы, применяемые для изготовления ограждения рабочего пространства печи (свод, стены, под)-огнеупоры и теплоизоляция?
8. Как учтены в конструкции печи особенность ее работы?
9. Какие расчетные методы применяются для определения тепловых потерь печи?
10. Как расчетным методом определить потери тепла при остывании печи?
11. В чем состоят особенности определения мощности печи.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА

Для интенсификации теплообмена в низкотемпературных печах ( $T_{печи} < 700^{\circ}\text{C}$ ) применяют принудительную циркуляцию печной атмосферы. Скорость циркуляции выбирается порядка 10–20 м/сек. Печи с циркуляцией широко применяют, например, при обработке алюминиевых сплавов. Это — печи гомогенизации, нагрева под прессование и прокатку, закалочные печи и печи искусственного старения. Широкое распространение этих печей объясняется их высокой надежностью, сравнительной простотой, хорошим качеством нагрева металла и высокими экономическими показателями. Коэффициент полезного действия у них достигает 70–80%. В общем теплообмене конвективная составляющая бывает обычно порядка 60–70%, поэтому главное внимание при проектировании таких печей необходимо обращать на характер обтекания потоком воздуха нагреваемых изделий, стремясь расположить их так, чтобы коэффициент конвективного теплообмена был наибольшим. С этой целью желательно применять большие скорости циркуляции и располагать изделия соответствующим образом. Нагрев изделий в печах с циркуляцией обычно трудно провести при постоянной температуре, так как при загрузке металла температура воздуха падает. Поэтому процесс нагрева осуществляют также в два этапа, как и в среднетемпературных печах. Расчет первого этапа начинают с определения постоянного потока тепла по параметрам процесса на стыке двух этапов

$$q_1 = \alpha_{общ} (T_{печи} - T_{изд}^{\prime\prime}) \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \text{ час}} \quad (31)$$

Отметим, что в печах с циркуляцией температура обычно лишь на  $20 + 50^{\circ}\text{C}$  превышает конечную температуру нагрева металла, а величина температуры металла в конце первого периода выбирается равной  $0,9 + 0,95$  от температуры нагрева. Причиной этого является то, что нагреваются обычно "тонкие" изделия и задача второго этапа — только довести температуру металла до заданного значения.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{общ}$  состоит из лучистой и конвективной составляющих. Коэффициент лучистого теплообмена вычисляют по значениям температур на стыке двух периодов нагрева

$$\alpha_{луч}^{\prime\prime} = C_{пр} \frac{(T_{печи}/100)^4 - (T_{изд}^{\prime\prime}/100)^4}{T_{печи} - T_{изд}^{\prime\prime}} \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \text{ час} \cdot \text{K}} \quad (32)$$

При вычислении  $\alpha_{\text{луч}}$  необходимо учесть, что в печах с циркулирующей атмосферой излучают стены рабочего пространства, а не циркулирующий газ. Вследствие диатермичности циркулирующего газа и возможна суперпозиция при подсчете потока тепла  $q_{\text{г}}$ .

Для определения конвективной составляющей коэффициента теплообмена применяют критериальные формулы. Приведем некоторые из них. Для продольного обтекания плоской пластины или прямых длинных заготовок вдоль их поверхности

$$Nu = 0,032 Re_f^{0,8} \quad (33)$$

Здесь в качестве характерного размера в критериях Рейнольдса и Нуссельта используется длина детали в направлении движения потока воздуха. При этом получается значение  $\alpha_k$  осредненное по длине детали. Для теплообмена потока воздуха, движущегося в трубе

$$Nu = 0,023 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} \quad (34)$$

Формула справедлива для  $Re > 5 \cdot 10^3$  при  $\frac{\ell}{d} > 40$ .

Для теплообмена цилиндров, призм, расположенных нормально к потоку воздуха  $Nu = C \cdot Re_f^n$ .

$Re_f$	$C$	$n$
$80 + 5 \cdot 10^3$	0,625	0,46
$5 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^4$	0,197	0,60
$5 \cdot 10^4 + 10^6$	0,023	0,80

Значения физических параметров воздуха, входящих в критерии подобия, следует выбирать в соответствии с индексами, указывающими, что  $T_f$  — определяющей температурой является температура потока;

$T_w$  — температура поверхности теплообмена;  $m$  — средняя температура.

$$T_m = \frac{T_f + T_w}{2}$$

Более подробные сведения о применении критериальных формул можно найти в работах [5, 6, 7] и др. учебных пособиях и справочниках.

После определения потока тепла, нагревающего изделия в первом этапе, определяем время нагрева

$$\tau_{\text{г}} = \frac{G_c (T_{\text{изд}}^* - T_{\text{изд}})}{q_{\text{г}} F_{\text{изд}}}$$

$$\tau_I = \frac{G_c (T_{\text{изд}}' - T_{\text{изд}})}{q_I F_{\text{изд}}} \quad (36)$$

Во втором этапе можно условно принять, что нагрев идет при постоянном коэффициенте теплоотдачи, равном  $\alpha_{\text{общ}} = \alpha_k + \alpha_{\text{луч}}$ . Значение  $\alpha_{\text{луч}}$  определяется как среднее по вычисленным  $\alpha_{\text{луч}}$  и  $\alpha_{\text{луч}}''$ . Интегрирование уравнения теплового баланса для второго этапа дает

$$\tau_{II} = \frac{G_c}{\alpha_{\text{общ}} F_{\text{изд}}} \ln \frac{T_{\text{печ}} - T_{\text{изд}}''}{T_{\text{печ}} - T_{\text{изд}}} \quad \text{час} \quad (37)$$

Более грубый прием по сравнению с расчетом нагрева "массивного" тела в среднетемпературной печи оправдан малой длительностью второго этапа и тем, что здесь не проводится выравнивание температурного поля в изделии. В печах с циркуляцией атмосферы могут обрабатываться длинномерные изделия (трубы, прутки, профили). В таких случаях необходимо определить время нагрева изделий, и величину перепада температуры по его длине. Решение проводится по графикам Шумана [7].

### Контрольные вопросы

1. С какой целью применяют принудительную циркуляцию печной атмосферы?
2. Каковы особенности теплообмена при наличии циркуляции?
3. До каких рабочих температур в печи рационально применять циркуляцию атмосферы?
4. Как ведется расчет нагрева в печах с циркуляцией атмосферы?
5. Как строится аэродинамический расчет и подбирается вентилятор?
6. Каковы конструктивные особенности спроектированной печи с циркуляцией атмосферы (конструкция рабочего пространства, калориферов, тип вентиляторов, вид контура циркуляции, механизмы загрузки и выгрузки деталей, способ перемещения деталей в печи—для методического нагрева и т.д.)?

### III. РАСЧЕТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В методических печах обрабатывают обычно крупные партии одинаковых изделий. Нагреваются изделия одно за другим, перемещаясь внутри печи. Сама печь работает в стационарном режиме, т.е.

в любой точке ее рабочего пространства температура не изменяется во времени. Для получения необходимого графика нагрева и хорошего качества нагрева методические печи чаще всего выполняют многозонными. В каждой зоне нагрев идет постоянным тепловым потоком. Мощность зон убывает (скачком от зоны к зоне) к выходу из печи. Схема процесса нагрева в многозонной печи показана на рис.8, из которого видно, что при таком профилировании мощности по длине печи можно получить нагрев, аналогичный нагреву в печи с постоянной температурой. При этом после интенсивного нагрева в первых зонах производится выравнивание температурного поля изделия в последних зонах печи. Для выравнивания температурного поля в конце нагрева методическая печь может иметь специальную так называемую "зону выдержки". Мощность ее нагревателей обычно лишь компенсирует потери зоны (через стены, окна и др.), и выравнивания поля температуры в изделии происходит лишь за счет перераспределения тепла в нем теплопроводностью.

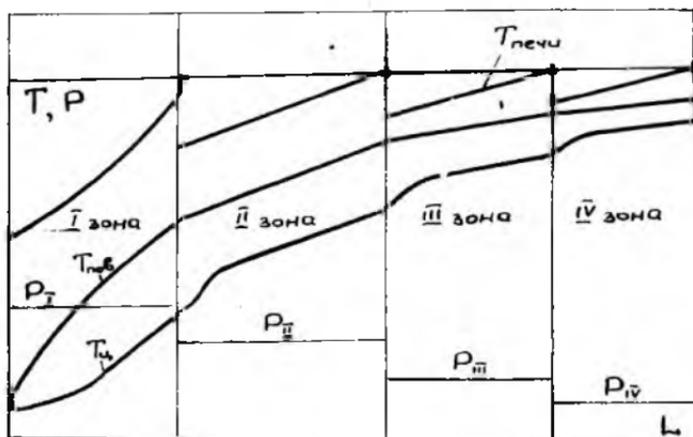


Рис. 8. Схема нагрева в многозонной печи

Проектирование методической печи также начинают с разработки эскиза, пробуя различные варианты. Для методических печей возникает дополнительная задача—выбор способа перемещения изделий в печи. Этот выбор допускает и различные решения, так как одной и той же производительности печи и тем же нагреваемым деталям

могут удовлетворять различные устройства. В методических печах обычно проектируют наклонный под, чтобы движение деталей осуществлялось под действием собственного веса. Это упрощает и удешевляет конструкцию. В случае, когда это невозможно, применяют различные устройства с толкателями, шагающие подпоковые балки, конвейеры различных конструкций, вибрационные переталкиватели и т.д. Выбор того или иного механизма или устройства для перемещения деталей определяется лишь после подробного анализа всех условий нагрева.

Главной задачей при расчете методической печи обычно является определение ее длины. Предполагая, что печь будет многозонной, рассматривают последовательно зоны, начиная с последней. Так как число зон неизвестно, можно взять в предварительном расчете их длину, равную одному метру. Время пребывания изделий в какой зоне можно определять, как

$$\tau = \frac{q}{E}, \quad (38)$$

где  $E$  - часовая производительность печи (задается обычно при проектировании),  $q$  - нагрузка на погонный метр длины печи (определяется конструкцией печи и размерами рабочего пространства). Так как в каждой зоне нагрев производится постоянным тепловым потоком, независимо от положения изделия в данной зоне, можно использовать методику расчета нагрева металла в первом этапе для печи периодического действия.

Так, для последней зоны методической печи тепловой поток

$$q_n = C_{np} \left[ \left( \frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пов.изд}}{100} \right)^4 \right] \frac{\kappa \text{ Дж}}{\text{час}}, \quad (39)$$

где  $T^{n1}$  - заданная температура нагрева металла.

Так как время нагрева в зоне известно, можно из формул

$$\begin{aligned} \text{для пластины} & - \tau_n = \frac{c p S (T_{пов.изд}^{n1} - T_{пов.изд}^n)}{q_n}; \\ \text{для цилиндра} & - \tau_n = \frac{c p R (T_{пов.изд}^{n1} - T_{пов.изд}^n)}{2 q_n} \end{aligned}$$

найти температуру изделия на входе в последнюю зону. При расчете последней зоны нужно определить и величину перепада температуры в изделии, чтобы решить вопрос о специальных мерах по выравниванию температуры. Перепад температуры вычисляется по формулам



ходимо добавить к печи зону выдержки. Для выравнивания температуры перед зоной выдержки необходимо создать запас тепла в изделии, перегрев его на поверхности на  $0,67 \Delta T_{\text{задание}}$  (пластина) или на  $0,5 \Delta T$  (цилиндр). При выравнивании температурного поля поверхность несколько охлаждается, а центральные части нагреваются. Этот процесс рассчитывается по графикам ([7] стр.176). Вычисление времени выравнивания температуры по сути определяет длину зоны выдержки. Так как нагрев в последней зоне протекает теперь несколько иначе (перегревают изделие на поверхности), при конструировании печи с зоной выдержки расчет нагрева по зонам можно скорректировать.

Для определения мощности методической печи производят сначала расчет для каждой зоны, затем их суммируют.

Расчетная формула для мощности зоны такая же, как и для печи периодического действия и поэтому вторично не приводится. Очевидной особенностью методической печи, вытекающей из принципа ее действия, является отсутствие потерь аккумулированного тепла. В частности по этой причине, а также вследствие меньших относительно потерь тепла излучением, возможности более точной отладки режима работы, методические печи имеют обычно наиболее высокий коэффициент полезного действия среди электрических печей сопротивления. Он может достигать 75-85%.

#### Контрольные вопросы

1. В чем сущность методического нагрева?
2. В чем состоят достоинства методических печей?
3. Что достигается при наличии в печи нескольких зон нагрева?
4. Как работает зона печи?
5. Как определяется или выбирается напряженность погонного метра пода печи?
6. Как определяется скорость движения изделий через печь?
7. Как ведется расчет кривой нагрева изделия по зонам и определяется длина печи?
8. Какими методами производится выравнивание температурного поля в изделии после нагрева в методической печи?
9. В чем особенности тепловой работы зон выдержки разных типов?

10. Каковы особенности конструкции спроектированной печи (конструкция зон, нагревателей, конвейера для перемещения деталей и т.д.)?

#### IV. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

После определения мощности печи проводят расчет нагревателей. Для этого необходимо знать все характеристики печи: размеры и конфигурацию рабочего пространства печи; величину поверхностей, которые могут быть использованы для размещения нагревателей; температуру печи и способ ее регулирования; питающее напряжение и материал нагревателя. Необходимо получить связь между электрическими параметрами нагревателя, его удельной поверхностной мощностью и размерами. Для вывода этой связи обозначим через  $P$  мощность рассчитываемого нагревателя, кВт;  $U$  - напряжение на нагревателе, в;  $R$  - сопротивление нагревателя, ом;  $\rho_r$  - удельное сопротивление нагревателя в горячем состоянии, ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  - длину нагревателя, м;  $S$  - поперечное сечение нагревателя, мм<sup>2</sup>;  $a, b$  - толщину и ширину сечения ленточного нагревателя, мм;  $\Pi$  - периметр сечения нагревателя, мм;  $F$  - поверхность теплообмена нагревателя, см<sup>2</sup>;  $W$  - удельную поверхностную мощность нагревателя, вт/см<sup>2</sup>;  $\delta$  - плотность материала нагревателя, кг/дм<sup>3</sup>;

Используя соотношения

$$\left( R = \frac{U^2}{10^3 P} \right); \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad \left( W = \frac{10^3 P}{F} \right), \quad (44)$$

можно получить диаметр или один из размеров ( $a$  или  $b$ ) сечения ленточного нагревателя

$$\left( d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \rho_r P^2}{\pi^2 U^2 W}} \right) \text{ мм}; \quad (45)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^4 m \cdot P^2}{m(m+1) U^2 W}} \text{ мм}, \quad (46)$$

где  $m = \frac{b}{a}$ . Этим соотношением следует задаваться, учитывая ГОСТ на металлические ленты. Весьма часто  $m = 10$ .

Длина и вес проволочного нагревателя определяются по формулам:

$$l = \left( \frac{R S}{\rho} \right) = \sqrt[3]{\frac{10 P U^2}{4 \pi \rho_r W^2}} \text{ м}; \quad (47)$$

$$q = j \ell S \pi^3 = j \sqrt[3]{\frac{0,634 \rho D^5}{U^2 W^4}} \quad \text{кг}; \quad (48)$$

$$\ell = \sqrt[3]{\frac{2,5 \rho U^2 m}{(m+1)^2 \rho W^2}} \quad \text{м}; \quad (49)$$

$$q = j \sqrt{\frac{0,625 \cdot m^2 \rho D^5}{(m+1)^4 \cdot U^2 W^4}} \quad \text{кг}. \quad (50)$$

В приведенных выше расчетных соотношениях все величины, кроме  $W$  получаются или расчетом, или задаются. Удельная поверхностная мощность нагревателя  $W \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$  является важнейшей величиной, определяющей его температуру в работе, и в конечном итоге срок службы. Определение  $W$  производится по формуле [2]

$$W = \alpha W_{уд}, \quad (51)$$

где  $W_{уд}$  - удельная поверхностная мощность ( $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ ) "идеального" нагревателя, т.е. нагревателя, имеющего вид сплошной, нагреваемой электрическим током оболочки внутри которой находится нагреваемый металл. Такой нагреватель конструктивно осуществим, а "идеальным" назван потому, что он является предельным случаем развития поверхности дискретных нагревателей. Для "идеального" нагревателя легко осуществляется расчет, так как теплообмен между нагревателем и металлом (полезный поток тепла) и между нагревателем и стенами печи (потери тепла) вычисляется отдельно. Для определения  $W_{уд}$  можно построить номограммы [1,2], где учитываются температура нагреваемого металла, температура нагревателя и излучательные свойства металла и нагревателя.

В приложении представлены графики такого типа. Коэффициент  $\alpha$  определяется по формуле

$$\alpha = \alpha_{эфф} \cdot \alpha_r \cdot \alpha_c, \quad (52)$$

где  $\alpha_{эфф}$  - коэффициент эффективности излучения данной системы нагревателя. Эта величина чаще всего определяется опытным путем, так как обычно трудно получить аналитическое решение для задачи об излучении тела сложной формы, каким является нагреватель. Для выбора  $\alpha_{эфф}$  рекомендуется таблица (см. Приложение), из которой видно, что выбор конструкции может быть неоднозначным. Здесь нужно учесть особенности печи, характер конструкции ее рабочего пространства, выбранный материал для нагревателя и другие частные

особенности проектируемой печи. Величина  $\alpha_r$  определяется по графикам, приведенным в Приложении. Там же приводятся пояснения для относительных витковых расстояний. Величина  $\alpha_r$  учитывает зависимость  $W$  от относительных витковых расстояний данного нагревателя. Коэффициент  $\alpha_c$  учитывает зависимость  $W$  от приведенного коэффициента излучения, т.е. по сути, при фиксированном значении степени черноты нагревателя (можно принять  $\epsilon = 0,8$ ) учитывается роль степени черноты нагреваемого металла (см. таблицу I в Приложении).

В дополнение к приведенной методике расчета нагревателей отметим, что при определении диаметра проволоки или размеров поперечного сечения ленточного нагревателя желательно применять более массивные (крупные) по толщине нагревательные элементы.

Исследования показали, что для таких нагревателей можно рабочую температуру выбирать большей, получить большую интенсивность теплообмена и, в конечном итоге ускорить нагрев и сэкономить дефицитный материал нагревателя. Если же для такого нагревателя выбрать более облегченные температурные условия, то это приведет к значительному увеличению его срока службы, что дает очевидный экономический эффект. В Приложении приведены графики, показывающие влияние массивности нагревателя на выбор его температуры. После определения размеров и конструкции нагревателя производится определение его температуры в работе по методике А.Д. Свенчанского [1].

В последнее время приведены исследования процесса окисления нагревателей [2]. Эти работы дают возможность оценить срок службы нагревателя после расчета его размеров и конструкции. Основой являются графики, построенные для определения срока службы нагревателя из проволоки диаметром 1 мм в атмосфере воздуха (см. Приложение). Срок службы — это время (час), за которое произойдет окисление проводника на 20% от первоначального сечения. Приводятся графики для шести различных сплавов, наиболее часто используемых в нагревателях. Для пересчета на другой диаметр проволоки или ленты применяются формулы:

$$T_{np} = d T_{(1)}; \quad (53)$$

$$T_{л} = \frac{0,25 a (11 - \sqrt{121 - 40 n})}{0,5 (1 - \sqrt{1 - n})} \cdot T_{(1)}, \quad (54)$$

где  $T_{(1)}$  - срок службы нагревателя из проволоки диаметром  $I$  мм, находится по графикам;  $a$  - толщина ленты, мм;  $l$  - окисленная доля сечения нагревателя, которая определяет срок службы.

Формула для ленты пригодна для  $\frac{b}{a} \gg 10$ . Для облегчения расчетов по нахождению сечения нагревателя в Приложении приводятся номограммы [2], позволяющие быстро проводить вычисления. Там же приводится схема, поясняющая как пользоваться номограммами.

Приведенная методика расчета нагревателей пригодна лишь для нагревателей средне- и высокотемпературных печей, где теплообмен происходит путем излучения.

Для низкотемпературных печей с циркулирующей печной атмосферой расчет нагревателей, находящихся в потоке воздуха (калориферов), производится по методике А.Д. Свенчанского [1].

Отметим, что калориферы работают в более легких температурных условиях, чем нагреватели излучения и срок службы у них обычно значительно больше.

#### Контрольные вопросы

1. Как осреднить условия работы нагревателей в проектируемой печи?
2. Какие основные факторы определяют срок службы нагревателей в электрических печах сопротивления?
3. По каким основным параметрам выбирается материал электрических нагревателей?
4. Как ведется расчет нагревателя?
5. Как определяется (проверяется) температура нагревателя в работе?
6. Как оценивается срок службы конкретно выбранного нагревателя?
7. Каковы свойства материалов, наиболее широко применяемых в настоящее время для изготовления нагревателей?
8. Какие основные требования предъявляются к материалам электрических нагревателей?
9. Чем вызвано разделение мощности печи на фазы и фаз на параллельные ветви?
10. В чем особенности работы электрокалориферов?

#### У. ВЫБОР СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕЧИ

После завершения расчетов необходимо выбрать способ регулирования температуры печи и конкретную схему автоматики. От правильного решения этих задач зависят многие характеристики печи

в работе: ее коэффициент полезного действия, точность нагрева изделий, характер температурного поля в изделиях в конце нагрева и т.п. От характера работы автоматики зависит длительность службы некоторых устройств печи, в частности нагревателей и футеровки. Автоматическое управление процессом нагрева помогает в одинаковом режиме обработать большие количества изделий, согласовать работу печей с работой прессов, ковочных машин или прокатных станов.

В случаях, когда печи входят в общий технологический процесс обработки деталей на поточных и автоматических линиях, их работа без автоматического управления вообще невозможна.

При хорошей работе системы автоматики достигается наиболее экономичная работа печи, высокие коэффициенты полезного действия мощности.

В последнее время целью автоматизации стало не только поддержание заданной температуры в печи, но и решение таких задач, как нагрев изделий по специальному графику. Например, в первых стадиях нагрева ведется форсированный режим, а затем процесс заканчивается в более "мягком" температурном режиме [1], [3]. С помощью систем автоматики стало возможным осуществлять нагрев с минимизацией угара металла. Подобные процессы исследованы теоретически [4] и начинают внедряться в практику.

Выполнение сложных процессов нагрева осуществляется в настоящее время системами автоматического управления, включающими ЭЦВМ.

Нужно отметить, что проектирование сложных систем автоматического управления процесса нагрева металла основывается на значительных успехах, достигнутых теплофизикой. Развитие аналитических методов решения задач нагрева при различных условиях воздействия внешней среды составило основу для программирования работы ЭЦВМ в системах автоматики.

В курсовом проекте (за исключением возможных специальных заданий) студент обязан представить задачи, стоящие перед системой автоматики, и для выполнения их использовать применяемые в промышленности схемы автоматики или синтезировать схему из стандартных элементов (реле, контакторы, электронные потенциометры).

Таким образом, в разделе проекта, рассматривающем автоматизацию печи, должна быть приведена и описана конкретная схема автоматики, которая в случае необходимости могла бы быть смонтирована в виде действующей схемы.

При выборе схемы автоматического управления необходимо

учитывать следующие факторы. Электрическая печь сопротивления как объект регулирования характеризуется обычно большой тепловой инерцией, что обусловлено значительной величиной суммарной тепловой емкости футеровки, теплоизоляции, конструктивных элементов печи и нагреваемого металла. Вследствие этого наблюдается отставание по фазе и отличие в амплитуде изменения температуры печи от теплового импульса регулирования. Это позволяет во многих случаях отказаться от непрерывного регулирования и остановить выбор на двух-или трехпозиционном регулировании, которое выполняется с помощью относительно несложных релейно-контакторных схем автоматики.

При использовании таких систем нужно учитывать и то, что проектируемые печи имеют значительную мощность, достигающую нескольких сотен киловатт. Поэтому очевидно, что регулирование путем периодического отключения и включения всей мощности печи недопустимо. Для этого используются группы регулирующих нагревателей, мощность которых составляет лишь несколько процентов от общей мощности. Остальные нагреватели включены постоянно. Величина мощности регулирующих нагревателей обычно подбирается при настройке работы печи, так как расчет мощности печи и нагревателей возможен пока с точностью  $\approx 10\%$ .

Для сохранения равномерного поля температуры в печи при регулировании необходимо регулируемую мощность разделить на отдельные "зоны" и разместить их по возможности равномерно среди нерегулируемых нагревателей. Управление такой "зоной регулирования" осуществляется обычно отдельной автономной схемой автоматики. Такой принцип осуществляется например в вертикальнозакалочных печах (ВЗП), печах искусственного старения изделий из легких сплавов, в печах гомогенизации слитков, в шахтных печах и т.д.

Рассмотрим схемы релейно-контакторного типа. Исполнительное устройство двухпозиционного регулятора может находиться лишь в двух фиксированных состояниях.

Переключение из одного положения в другое происходит тогда, когда регулируемая величина проходит через заданное значение. Таким образом, для таких схем свойственно наличие интервала, в котором происходят колебания регулируемой температуры и соответствующего этой величине интервала, в котором изменяется (скачком) мощность. Одно из положений исполнительного устройства выбирается таким, чтобы подводимая мощность была заведомо больше потребляемой,

тогда регулируемая температура растет. Во втором состоянии регулирующего органа подводимая мощность меньше потребляемой, что вызовет снижение температуры.

На рис.10 показано регулирование неполной мощностью печи.

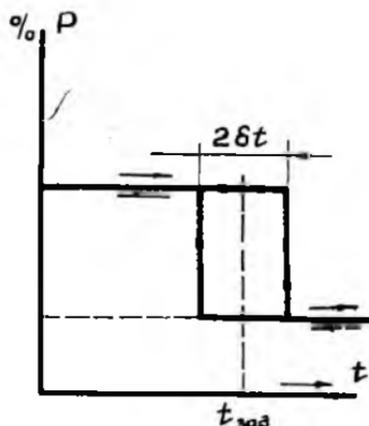


Рис.10. Характеристика релейного двухпозиционного регулятора

Величина  $\delta T$  может быть названа зоной нечувствительности. Настройку регулятора можно производить, изменяя  $P_1, P_2, \delta T$ .

Конкретная схема двухпозиционного автоматического регулирования печи показана на рис.11. Датчиком температуры является термоспара  $T$ , установленная в рабочем пространстве печи. В качестве измерительного устройства ИП в схему может быть встроен

электронный потенциометр (ЭП-09, ЭП-17 и др.) Приборы такого типа имеют контакты, которые замыкаются или размыкаются, когда температура достигает заданного значения. Эти контакты используются в схеме для включения или отключения промежуточного реле РП, управляющего работой мощного контактора  $K$ , который включает или отключает группу регулирующих нагревателей в своей "зоне". Электронные потенциометры одновременно показывают величину температуры и регистрируют ее ход во времени на диаграмме в виде непрерывной кривой или отдельных точек (многоточечные приборы на несколько каналов). Это удобно, так как при настройке работы автоматики используется прибор самой системы. Схема, приведенная на рис. 11, позволяет управлять нагревом в ручном и автоматическом режимах. Универсальный переключатель УП осуществляет переход от ручного к автоматическому управлению и наоборот. В положении автоматического управления А замыкаются контакты УП-1 и УП-2. При температуре печи меньше заданной контакт потенциометра ИП замкнут, реле РП и контактор  $K$  включены, и идет нагрев печи с полной мощностью. Этот период в случае загрузки в печь холодного

металла обычно достаточно растянут и образует первый этап нагрева при постоянном тепловом потоке. После достижения заданной температуры ( $+\delta T$ ) начнется собственно работа автоматики по регулированию температуры печи (поддержание постоянного среднего значения). Минимальный контакт ИП разомкнется, будут отключены реле РП и контактор К. Часть мощности печи (регулирующая мощность) отключится и начнется понижение температуры печи. При достижении температуры печи значения  $T_{заданн} - \delta T$  потенциометр снова с помощью РП и контактора К включит регулирующие нагреватели и температура начнет повышаться.

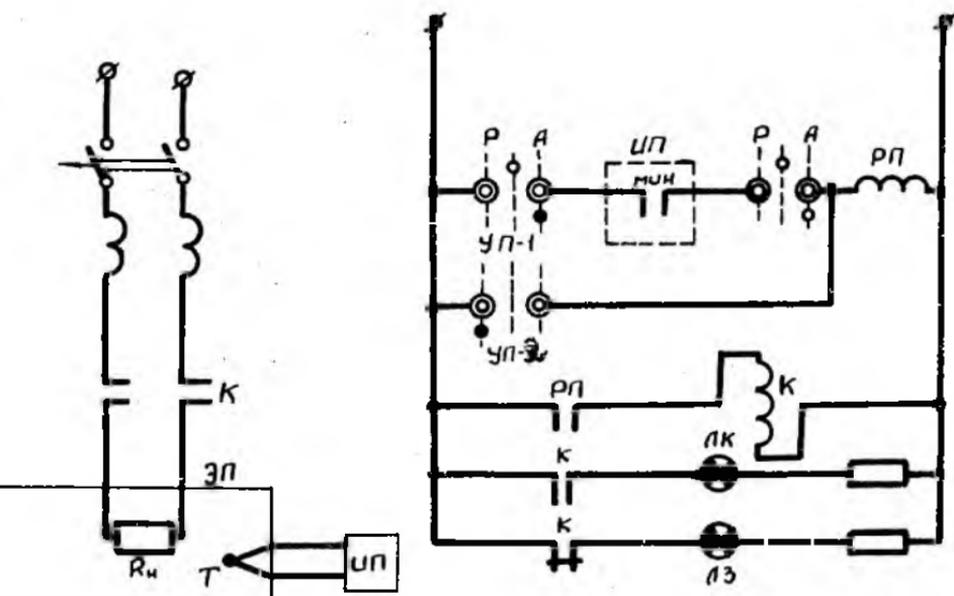


Рис. 11. Схема двухпозиционного регулирования температуры электропечи сопротивления

Из таких повторяющихся циклов регулирования и складывается второй этап нагрева изделий—при постоянном (среднем) значении температуры печи. Характер изменения температуры и мощности печи показаны на рис.12.

Средняя мощность печи во втором этапе зависит от соотношения времени включенного и отключенного состояний нагревателей регулирования печи. Полезная мощность (пунктир на рис.12) непрерывно убывает.

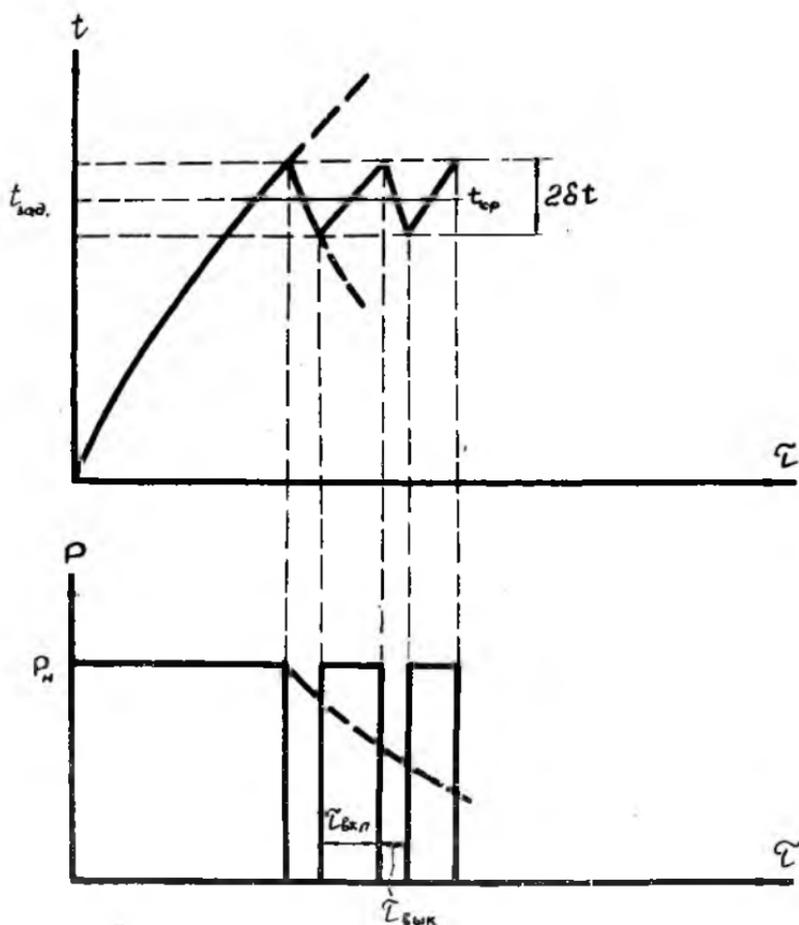


Рис.12. Процесс двухпозиционного регулирования электропечи сопротивления

Приведенная схема обладает и недостатками, главный из которых состоит в том, что в процессе регулирования нельзя изменить соотношение  $P_1$  и  $P_2$ , т.е. величину регулирующей мощности и зону нечувствительности регулятора. Однако такие схемы широко применяются, так как в действительности за счет значительной тепловой инерции печи с металлом и при правильном размещении и выборе нагревателей регулирования и датчика температуры удается получить сравнительно небольшие колебания температуры печи при регулировании.

Расчеты и опыты показали, что нагреваемый металл (особенно в случае большой загрузки печи) не воспринимает этих колебаний и нагревается как при постоянной температуре печи.

В тех случаях, когда печь длительно работает с резко переменным потреблением мощности, целесообразно применять трехпозиционное регулирование. Примером может служить печь периодического действия для нагрева изделий с последующей длительной выдержкой — печь старения алюминиевых сплавов и др.

В начале цикла требуется быстро разогреть печь с садкой, а затем произвести длительную выдержку изделия при заданной температуре.

В стадии выдержки превышение установленной мощности над потребляемой может быть весьма значительным, так как потребляемая мощность расходуется фактически лишь на компенсацию тепловых потерь. В итоге регулирования может получиться весьма грубым (значительная разность  $P_1 - P_2$  — рис. 10), и температура изделий может испытывать недопустимые по амплитуде колебания. При трехпозиционном регулировании мощность имеет промежуточное значение. Это осуществляется или переключением нагревательной печи с треугольника на звезду, или отключением части нагревателей регулирования при переходе на вторую ступень мощности.

Схемы процесса регулирования и автоматики трехпозиционной системы приведены на рис. 13, 14.

При температуре печи ниже заданной при включении универсального переключателя в положение А контактор 1К включает максимальную мощность  $P_2$ . По достижении заданной температуры (точка 1) размыкается "минимальный" контакт электронного потенциометра ИП, а "нормальный" — замыкается. Контактор 1К размыкается, а 2К — включается. В итоге происходит переключение нагревателей на схему "звезда", мощность снижается в три раза. Мощность эта меньше потребляемой и температура станет снижаться, что приведет к размыканию "нормального" и замыканию "минимального" контакта. Снова включается полная мощность (треугольник) и температура печи начнет повышаться и т.д.

Таким образом, на этом этапе нагрева регулирование идет по двухпозиционному принципу. Однако по мере нагрева изделия и достижения температуры, при которой должна далее идти выдержка, "частичная" мощность  $P_A$  превышает потребляемую мощность и температура будет продолжать возрастать, это приведет к размыканию "нормального"

контакта ( точка 6 ) и полному отключению печи. На этом этапе также будет происходить двухпозиционное регулирование печи, но в интервале мощностей  $P_{\lambda} \neq 0$ .

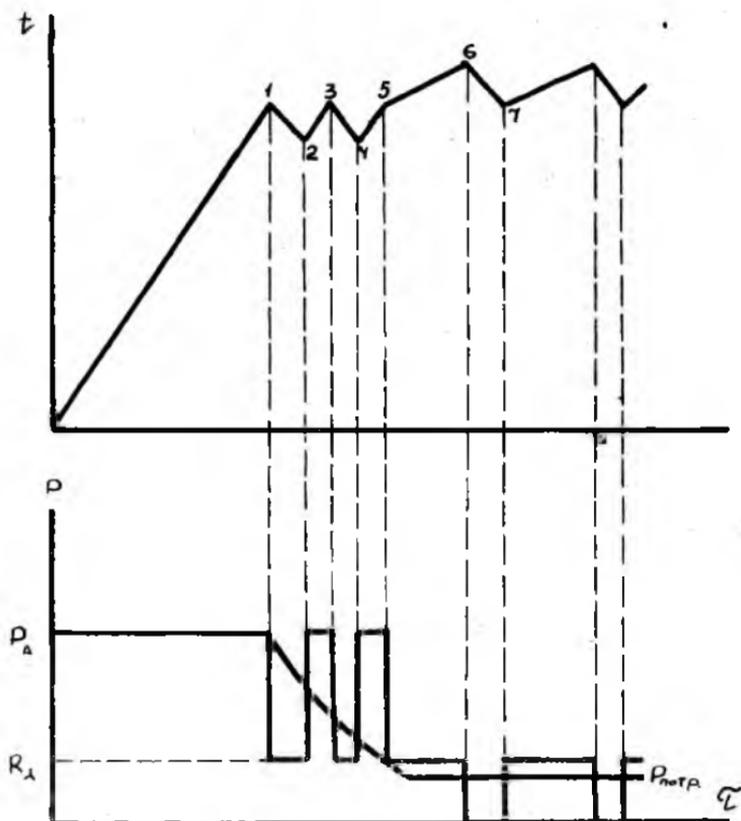


Рис. 13. Процесс трёхпозиционного регулирования температуры электропечи сопротивления

Отметим, что здесь так же, как и ранее, все операции регулирования мощности ( $P_{\Delta} \div P_{\lambda} + \delta$ ) производятся не с полной мощностью печи, а с отдельными группами нагревателей предназначенными для регулирования.

Рассмотренные схемы регулирования применяют для многих видов печей, особенно если учесть, что их характеристики могут

быть улучшены правильным выбором датчика температуры и его расположением в печи, правильным выбором мощности регулирующих нагревателей. Разнообразные схемы регулирования и методы улучшения их работы рассмотрены в ряде руководств [1,3].

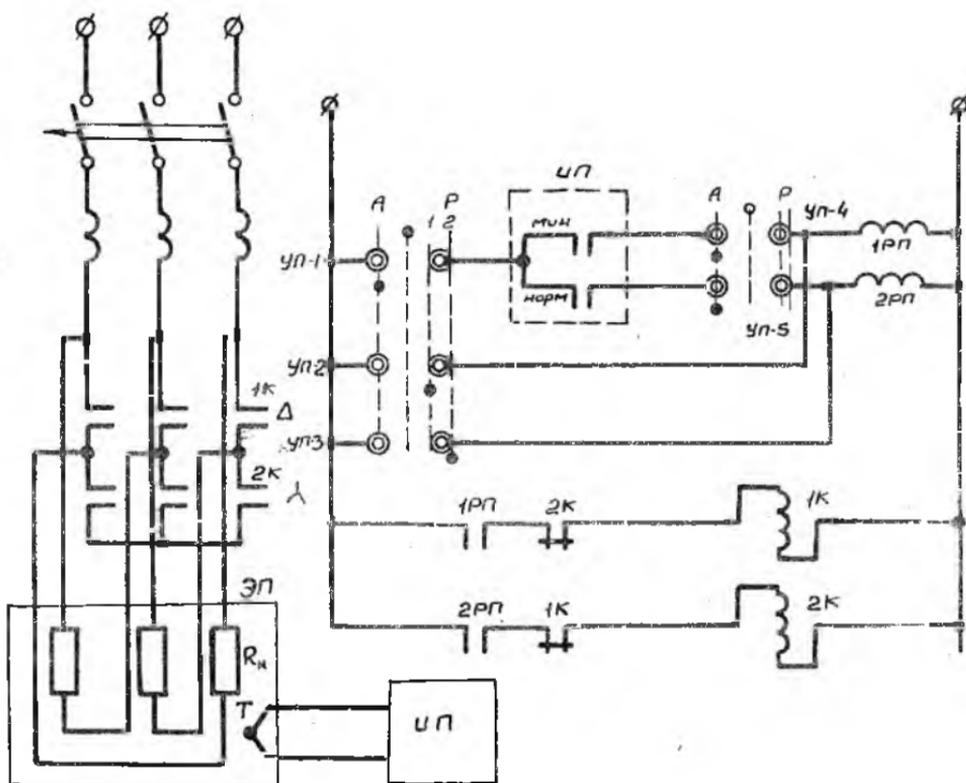


Рис.14. Схема трехпозиционного регулирования температуры электропечи сопротивления

Перед выбором системы автоматического регулирования необходимо хорошо ознакомиться с основными процессами регулирования и с возможными вариантами конкретных схем.

В заключение отметим, что здесь были рассмотрены лишь схемы автоматического регулирования температуры печей.

Однако в ряде случаев печные агрегаты содержат устройства, которые также управляются автоматически и связаны в своей работе с автоматикой температуры. Примером могут служить индукционные методические печи, где автоматика нагрева связана с устройствами загрузки и выгрузки деталей (рольганг, толкатель), печи с принудительной циркуляцией воздуха для нагрева легких сплавов, где автоматика регулирования нагревателей заблокирована с работой вентилятора и т.д.

Схемы автоматики должны включать в себя также различные предохранительные и блокирующие устройства, которые обеспечивают безопасность обслуживающего персонала, сохранение агрегата и отдельных узлов в случае перегрузки или при авариях - для этого применяют различные концевые выключатели, отключающие установку, если случайно будут открыты крышки или двери блоков, содержащих электрооборудование; реле давления воды в индукционных установках, отключающее печь, если снизилось давление воды, охлаждающей индуктор, или прекратилась ее подача и т.д. Все эти необходимые детали автоматики должны быть при проектировании внесены в конкретную схему управления печью.

В приложении приводятся конкретные типовые схемы из практики автоматического регулирования и электропривода, которые могут быть использованы при проектировании.

#### Контрольные вопросы

1. Какие задачи ставятся при автоматическом регулировании нагрева?
2. Какие принципы положены в основу плавного регулирования?
3. В чем состоят основные особенности двухпозиционного способа регулирования?
4. Какие основные характеристики описывают работу системы двухпозиционного регулирования?
5. Как работает конкретная схема двухпозиционного автоматического регулирования?
6. Каковы особенности трехпозиционного регулирования?
7. Какие величины характеризуют работу схемы трехпозиционного автоматического регулирования?
8. Из каких элементов синтезируется схема автоматического регулирования нагрева в печах?
9. Каким образом схема регулирования выбрана в данном проекте?
10. Как работает выбранная схема регулирования?

11. Какие приборы и устройства применены в схеме?
12. Каким образом можно изменять характеристики выбранной системы автоматического регулирования при настройке, наладке или переходе на другой режим работы печи?
13. Какой прибор выбран в качестве датчика температуры, как он работает и где расположен в рабочем пространстве?
14. Какие факторы были учтены при выборе соотношения мощностей в ступенях регулирования?

## VI. СПЕЦТЕМА ПРОЕКТА

Каждый проект помимо основного задания (расчет времени нагрева металла, расчет теплового баланса печи и др.) содержит специальную тему.

Под спецтемой понимается индивидуальное задание, которое при разработке требует от студента ознакомления с несколькими литературными источниками, монографиями, журнальными статьями, ознакомления с опытом передовых предприятий.

Рассмотрим характер работы над спецтемой на следующих примерах.

### Спецтема "Автоматика печи".

Это задание требует ознакомления с основами автоматического регулирования и элементами схем теплоавтоматики-датчиками температуры и их характеристиками, с наиболее распространенными измерительными, регистрирующими и регулирующими приборами, с основными видами исполнительных устройств и механизмов.

Далее студент исследует возможные пути решения задачи автоматизации спроектированной печи, сопоставляет различные схемы автоматики, уясняет принципы их действия и отмечает достоинства и недостатки. Эта стадия выполнения спецтемы, которая могла бы быть названа стадией анализа, наиболее ценна тем, что студент при возможности неоднозначного решения проблемы активно изучает и сравнивает возможные варианты. В курсовом проекте эта часть должна быть изложена подробно, так как по ее оформлению можно судить насколько глубоко и детально проработан материал по теме.

Вторая часть работы над спецтемой ("синтез") состоит в выборе конкретной схемы автоматики, наилучшим образом отвечающей заданию. Выбор схемы производится или из нескольких схем, изученных по литературным данным, или по данным передовых предприятий,

ста на основе синтеза из отдельных схем и элементов автоматики. В том, и другом случае описание схемы автоматики и ее работы должно быть подробным, с необходимыми расчетами, чертежами и графиками. В тексте обязательны ссылки на использованную литературу.

### Спецтема "Безокислительный нагрев металла".

При разработке данной темы студент должен уяснить важность проведения безокислительного нагрева металла, учитывая громадные потери металла в результате утара в масштабе промышленности страны.

Для конкретного процесса нагрева, исследуемого в проекте, необходимо достаточно детально проанализировать процессы окисления ( и обезуглероживания) металла. После этого анализируются возможные пути предохранения металла (частичного или полного) от вредного воздействия печной атмосферы при высоких температурах. В связи с тем, что в настоящее время проблемы защиты металла от утара решаются многими способами (скоростной нагрев, нагрев в вакууме, защитные обмазки, защитные атмосферы и т.д.), возможно сужение проблемы, по согласованию с консультантом. Например, поиск решения может быть направлен по пути выбора защитной атмосферы. Разумеется в любом случае требуется достаточно глубокое ознакомление с современным состоянием проблемы по литературным данным и если они доступны — по данным передовых предприятий.

После детального анализа и сравнения различных вариантов применения защитных атмосфер производится окончательный выбор решения. Приводится подробное описание механизма действия защитной атмосферы и конструктивных особенностей появляющихся у печи, работающей с защитной атмосферой; рассматриваются процессы нагрева в такой печи и метод получения защитного газа; схема промышленной установки.

Необходимо уделить достаточное внимание вопросам промышленной санитарии и техники безопасности при работе печей с защитными газами. Данная спецтема может быть решена и иначе. В ряде случаев консультант определяет состав защитной атмосферы для нагреваемого металла и тогда основным содержанием спецтемы становится конструктивная разработка печи с герметичными шлюзами для загрузки и выгрузки деталей, герметизация выводов электронагревателей, подвижных частей печи и т.п. Работа такого типа также требует разработки ряда вариантов решений, ознакомления с описанными в литературе конструкциями, их сравнительного анализа и выбора оптимального варианта.

В ряде случаев окончательный вариант разрабатывается в процессе проектирования, так как среди известных решений нет аналога. Этот путь наиболее трудный, но и наиболее интересный и полезный.

Поскольку спецтемы могут значительно отличаться и по тематике, и по объему работы, нельзя требовать единообразия в их оформлении.

Единственно обоснованным требованием следует считать подробное изложение материала, наличие необходимых ссылок на использованную литературу, наличие необходимых иллюстраций. Объем же (число страниц, число иллюстраций и т.д.) определяется совместно с консультантом.

В качестве спецтемы могут быть предложены задания:

1. Расчет температурного поля в детали.
2. Нагрев в вакууме.
3. Скоростной нагрев изделий.
4. Комбинированный пламенно-индукционный нагрев.
5. Нагрев кварцевыми излучателями.
6. Нагрев листа на воздушной подушке.
7. Расчет процесса остывания изделий в печи.
8. Обзор методов безокислительного нагрева металла.
9. Анализ процесса окисления металла при нагреве.
10. Оптимизация нагрева металла по окислению.
11. Методы автоматического регулирования нагрева в печах.
12. Обзор методов механизации и автоматизации процессов загрузки и выгрузки металла в печах.
13. Методы повышения к.п.д. печей и снижения расхода энергии на нагрев металла.

Л И Т Е Р А Т У Р А

I. ТЕОРИЯ ТЕПЛОСБМЕНА, МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАГРЕВА  
В ПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

1. Михеев М.А. Основы теплопередачи. ГЭИ, 1956.
2. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. "Энергия", Л, 1969.
3. Гребер Г., Эрк С., Григудль У. Основы учения о теплообмене. ИЛ, М, 1958.
4. Шорин С.Н. Теплопередача. "Высшая школа", М, 1964.
5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. "Энергия", Л, 1968.
6. Китаев Б.И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. "Металлургия", М, 1970.
7. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. ГЭИ, М, 1958.
8. Гольдфарб Э.М. Техника металлургических процессов. "Металлургия", М, 1967.

II. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

1. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. ГЭИ, М, 1958.
2. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. Мамгиз, М, 1957.
3. Скворцов А.А. и др. Нагревательные устройства. "Высшая школа", М, 1965.
4. Кацевич Л.С. Некоторые вопросы конструирования электрических печей сопротивления. Изд. МЭИ, 1951.
5. Смелянский М.Я. Электрооборудование и типовые схемы включения термических печей. Изд. Мэи, 1953.

III. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

1. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. ГЭИ, М, 1958.
2. Фельдман И.А., Гутман М.Б., Рубин Г.К. Расчет нагревателей электропечей сопротивления.
3. Миндин Г.Р. Электронагревательные трубчатые элементы. "Энергия", М, 1965.

IV. АВТОМАТИКА ПЕЧЕЙ, КОНТРОЛЬ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

- ✓ 1. Свенчанский А.Д., Трейзон Э.П. Автоматизация электротермических установок. "Энергия", М, 1968.

2. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. Металлургиздат, М, 1960.

✓ 3. Свенчанский А.Д., Гуттерман К.Д. Автоматическое регулирование электрических печей. "Энергия", М, 1965.

4. Герасимов С.Г. Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов. "Высшая школа", М, 1967.

5. Чиликины И.Г. Общий курс электропривода. "Энергия", М, 1965.

✓ 6. Шляндин В.М. Элементы автоматики и телемеханики. Оборонгиз, М, 1954.

7. Гордов А.Н. Основы пирометрии. "Металлургия", М, 1964.

8. Попов М.М. Термометрия и калориметрия. Изд. МГУ, М, 1954.

9. Приборы и регуляторы для контроля и автоматизации теплоэнергетических процессов. Стандартгиз, 1965.

10. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. ГЭИ, М, 1958.

11. Топеверх Н.И., Шерман М.Я. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы на металлургических заводах. Металлургиздат, М, 1956.

✓ 12. Вишняков Д.Я. и др. Оборудование, механизация и автоматизация в термических цехах. "Металлургия", М, 1964.

#### У. СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дыков А.В. Теплообмен (справочник). "Энергия", М, 1972.

2. Кутателадзе С.С., Боршанский В.М. Справочник по теплопередаче, ГЭИ, М, 1959.

3. Теплофизические свойства веществ (под ред. Варгафтика Н.Б.). ГЭИ, М, 1956.

4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Автоматиздат, М, 1968.

5. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. Mashgiz, М, 1962.

6. Электротермическое оборудование (справочник). "Энергия", М, 1967.

7. Шмыков А.А. Справочник термиста. Mashgiz, М, 1956.

8. Рысин С.А. Справочник по вентиляторам. Госстройиздат, 1955.

9. Григорьев Б.А., Нужный В.А., Шибанов Б.В. Таблицы для расчета нестационарных температур плоских тел при нагреве излучениями. "Наука", М, 1971.

10. Миткаленый В.И. и др. Металлургические печи (атлас). "Металлургия", М, 1964.

11. Малиев Ю.Н. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах (часть I и II). Куйбышев, 1967.

12. Клименко А.П., Каневец Г.Е. Расчеты теплообменных аппаратов на электронных вычислительных машинах. "Энергия", М-Д, 1966.

13. Электронагреватели карбидкремниевые для печей сопротивления (ГОСТ 16139-70). Комитет стандартов и мер при СМ СССР, М, 1970.

14. Обозначения условные и графические в схемах (ЕСКД). Комитет стандартов и мер при СМ СССР, М, 1969.

#### У1. ЛИТЕРАТУРА ПО СПЕЦИАЛЬНЫМ ВОПРОСАМ

1. Рубин Г.К. Печи скоростного нагрева. "Энергия", М, 1969.

2. Рубин Г.К. Электронпечи с нагревателями из дисилицида молибдена. "Энергия", 1964.

3. Григорьев В.Н. Кольцевые печи для нагрева металла. Металлургиздат, 1958.

4. Малый С.А. Экономичный нагрев металла. "Металлургия", М, 1967.

5. Тылкин М.А., Ялсовой Н.И., Полушин П.И. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования. "Высшая школа", М, 1970.

6. Альтгаузен А.П. Низкотемпературный электронагреватель. М, 1968.

7. Миндин Г.Р. Электронагревательные трубчатые элементы. "Энергия", М, 1965.

8. Лейканд М.С. Конструкция вакуумных электронпечей сопротивления и узлов. "Энергия", М, 1971.

9. Броввер Ю.М. и др. Уплотняющие устройства электронпечей сопротивления. "Энергия", М, 1971.

10. Фомин В.М. Вакуумные печи сопротивления с экранной изоляцией. "Энергия", М, 1970.

11. Лейканд М.С. и др. Вакуумно-компрессионные электрические печи. "Энергия", М, 1971.

12. Гуревич В.З. Электрические инфракрасные излучатели. "Энергия", М, 1963.

13. Вакуумные системы и их элементы (справочник-атлас). Машгиз, М, 1968.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В приложениях I и II помещены графики и таблицы, с помощью которых проводится изложенный в разделе IV расчет электрических нагревателей печей сопротивления.

Материалы приложения II могут быть использованы при разработке схемы управления и автоматического регулирования печей сопротивления.

Материалы, помещенные в приложениях, не могут, естественно, охватить все вопросы, возникающие при расчете нагревателей или при проектировании автоматики. Дополнительные сведения поможет получить список рекомендуемой литературы.

Таблица П-1

Значения коэффициентов лучеиспускания относительного  $\epsilon$  и приведенного  $C$  при нагреве некоторых металлов в электропечах с нагревателями, имеющими  $\epsilon=0,8$  и соответствующие им значения коэффициента  $d_c$

Нагреваемый материал	Коэффициент лучеиспускания		
	Относительный	Приведенный	$d_c$
Оксидированная сталь	0,8	3,84	1,0
Оксидированная медь	0,7	3,44	0,91
Оксидированная латунь	0,6	3,0	0,81
Оксидированный алюминий	0,3	1,61	0,46
Сталь неоксидированная	0,45	2,34	0,64
Медь или латунь неоксидированные	0,3	1,61	0,46

Таблица П-2

Значения коэффициента эффективности излучения  $\alpha_{эфф}$  для различных систем нагревателей.

Система нагревателя	Проволочный зигзаг	Ленточный зигзаг	Ленточный зигзаг в балках печей типа "САН" или в вьемных рамках	Проволочная спираль на трубке	Проволочная спираль на трубке	Спираль в балках печи типа "САН"
$\alpha_{эфф}$	0,68	0,4	0,34	0,32	0,32	0,22
Минимальные относительные витковые расстояния (выбранные из конструктивных соотношений), для которых определены $\alpha_{эфф}$	$\frac{h}{d} = 1,75$	$\frac{h}{b} = 0,8$	$\frac{h}{b} = 0,8$	$\frac{t}{d} = 2$	$\frac{t}{d} = 2$	$\frac{t}{d} = 2$

## СОДЕРЖАНИЕ

I. Содержание и объем проекта .....	3
II. Расчет печи периодического действия .....	4
1. Эскизное проектирование печи .....	4
2. Расчет нагрева металла .....	5
3. Тепловой баланс печи .....	16
4. Особенности расчета печей с принудительной циркуляцией воздуха ....	24
III. Расчет методической печи .....	26
IV. Расчет электрических нагревателей печей сопротивления .....	31
V. Выбор схем автоматического регулирования печи	34
VI. Спецтема проекта .....	44
ЛИТЕРАТУРА .....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	51