

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Кафедра «Технология функциональных и конструкционных материалов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ»

Направление подготовки	22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»
Квалификация(степень) выпуска	бакалавр
Форма обучения	очная

Составитель
ШАРШИН В.Н.

Владимир 2019

Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Тепловые процессы и агрегаты»/ Владим. гос. ун-т; Сост. В.Н. Шаршин. Владимир, 2001. 20 с.

Служат руководством к проведению курсовой работы по дисциплине «Тепловые процессы и агрегаты». Основной целью методических указаний является изучение методики практического расчета электропечей сопротивления, которая включает следующие основные разделы: определение геометрических разделов печи, тепловой расчет печи, расчет нагревателей. Методические указания снабжены необходимой справочной информацией, представленной в приложении.

Предназначены для студентов очной формы обучения по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» ВлГУ, рабочей программы дисциплины «Тепловые процессы и агрегаты». Составитель к.т.н., доцент Шаршин В.Н.-Владимир, 2019, 22 с.

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
22.03.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
Протокол № 9 от 7.06.2019 г.

Рукописный фонд кафедры
ТФ и КМ ВлГУ

ПРЕДИСЛОВИЕ

При подготовке методических указаний к курсовой работе по дисциплине «Тепловые процессы и агрегаты» использован опыт преподавания на кафедрах, выпускающих специалистов указанной специальности, а также методические материалы, справочники и пособия, написанные ведущими преподавателями литейных и материаловедческих кафедр Российских вузов (МИСиС, ЮУрГУ, КГУЦм, САМГТУ, ТомПУ и др.).

В ходе выполнения курсовой работ у студентов будут сформированы следующие общекультурные и профессиональные компетенции:

- Обладать способностью к самоорганизации и самообразованию (ОК-7);
- Обладать способностью использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации (ПК-4);
- Обладать способностью применять знания об основных типах современных неорганических и органических материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учётом требований технологичности, экономичности, надёжности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов (ПК-11);
- Обладать способностью использовать на производстве знания о традиционных и новых технологических процессах и операциях, нормативных и методических материалах о технологической подготовке производства, качестве, стандартизации и сертификации изделий и процессов с элементами экономического анализа (ПК-16).

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

В курсовой работе студентам предлагается выполнить расчет камерной электропечи сопротивления для нагрева отливок (слитков).

Исходные данные для расчета (выдаются преподавателем):

G - производительность печи (кг/ч);

m - масса одной отливки (слитка);

$t_{\text{м}}^{\text{нач}}$ - начальная температура отливок (слитков) ($^{\circ}\text{C}$);

$t_{\text{м}}^{\text{кон}}$ - конечная температура нагрева отливок (слитков) с указанием диапазона возможных отклонений температуры от требуемой Δt , $^{\circ}\text{C}$;

U - напряжение питающей сети, В;

$s \times l \times h$ - размеры отливок (слитков), м.

Курсовая работа включает в себя выполнение следующих расчетов:

- определение геометрических размеров печи;
- тепловой расчет печи;
- расчет нагревателей.

В курсовой работе студенты выполняют следующие эскизы:

- эскиз компоновки отливок (слитков) на поддоне печи;
- эскиз компоновки нагревателей на стенах, своде и поду печи;
- общий вид печи с необходимыми размерами.

Эскизы выполняются на стандартных листах формата А3 или А4 и подшиваются к пояснительной записке.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПЕЧИ

Для печей данного типа при двухстороннем нагреве изделий напряжение активного пода $P_{\text{п}} = 500 - 700 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Принимая некоторое среднее значение, например $P_{\text{п.ср}} = 600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, находим площадь пода, занятую металлом

$$F'_{\text{м}} = G / P_{\text{п.ср}}$$

Отливки (слитки) нагреваются на поддонах. Задаемся шириной поддона $B'_{\text{м}}$ (с учетом размеров отливок) и определяем длину поддона

$$L'_{\text{м}} = F'_{\text{м}} / B'_{\text{м}}$$

Учитывая, что нагревательные элементы, расположенные на стенках печи, выступают внутрь стен рабочего пространства на 50 - 150 мм, а расстояние от нагревательных элементов до отливок (слитков) не должно быть меньше 100 - 250 мм, принимаем ширину B' и длину L' рабочего пространства печи, (м).

При двустороннем нагреве нагревательные элементы расположены также на

своде и на поду. Учитывая рекомендованные расстояния между нагревателями, стенками печи и нагреваемым металлом, принимаем расстояние между сводом и нагреваемым металлом 0,35 м, а между поддоном и подом 0,15 м.

Принимаем высоту садки H_c . С учетом принятых величин и высоты H_c определяем общую высоту рабочего пространства печи H .

Принимаем за теплоотдающую поверхность печи внутреннюю поверхность ее футеровки и, считая газовую среду лучепрозрачной, находим приведенный коэффициент излучения по формуле, Вт/(м²·К⁴),

$$C_{пр} = 5,7 / \left[\frac{1}{\varepsilon_m} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{п}} - 1 \right) \frac{F_m}{F_{п}} \right],$$

где F_m - тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, $F_m = 2 \cdot F'_m$, м²;

где $F_{п}$ - теплоотдающая поверхность печи ($F_{п} = 2 \cdot L \cdot B + 2 \cdot L \cdot H + 2 \cdot B \cdot H$), м²; ε_m и $\varepsilon_{п}$ - соответственно степень черноты поверхностей металла и футеровки печи определяем по табл.П2

Далее определяем средний коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К),

$$\alpha_{изл} = \frac{C_{пр} \sqrt{[(T_{г}/100)^4 - (T_{м}^{нач}/100)^4] \cdot [(T_{г}/100)^4 - (T_{м}^{кон}/100)^4]}}{\sqrt{(T_{г} - T_{м}^{нач}) \cdot (T_{г} - T_{м}^{кон})}} \quad (1),$$

где $T_{г}$ и $T_{м}$ - абсолютные температуры газа в рабочем пространстве печи и отливка (слитков); индексы «нач» и «кон» соответствуют начальной и конечной температурам отливок.

В расчетах по формуле (1) ориентировочно принимаем температуру газов в рабочем пространстве печи, °С,

$$T_{г} = t_{м}^{кон} + (50 - 70),$$

Принимая коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha^{конв} = 11,63$ Вт/(м²·К), находим суммарный коэффициент теплоотдачи к металлу:

$$\alpha = \alpha^{изл} + \alpha^{конв}.$$

Находим критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda},$$

где S - толщина отливки, м.

Температурный критерий для поверхности отливок

$$\Theta_{пов} = (t_{г} - t_{м}^{кон}) / (t_{г} - t_{м}^{нач}),$$

где $t_{г}$, $t_{м}^{кон}$, $t_{м}^{нач}$ - соответствующие температуры, °С,

По найденным значениям Bi , $\Theta_{пов}$ и номограмме (рис.П1 приложения) находим критерий Фурье Fo .

Коэффициент теплопроводности, входящий в критерий Фурье, м²/с:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho),$$

Продолжительность нагрева определяем по формуле, с

$$\tau = Fo S^2 / a,$$

При найденных значениях Bi и Fo по номограмме (рис. П2 приложения) находим температурный критерий для центра отливок $\Theta_{\text{цент}}$.

Тогда из выражения для $\Theta_{\text{цент}}$ определяем $t_{\text{цент}}^{\text{кон}}$.

$$\Theta_{\text{цент}} = (t_{\text{г}} - t_{\text{цент}}^{\text{кон}}) / (t_{\text{г}} - t_{\text{цент}}^{\text{нач}}),$$

Сравним полученные значения конечной температуры центра отливки с заданной температурой нагрева и определим перепад температур $\Delta t = t_{\text{м}}^{\text{кон}} - t_{\text{цент}}^{\text{кон}}$. Величина Δt не должна превышать значения, указанного в задании. В противном случае необходимо изменить значение температуры газов в печи $t_{\text{г}}$ и повторить расчет.

Уточняем основные размеры печи. Для обеспечения заданной производительности в печи одновременно должно находиться следующее количество металла, кг

$$M = \tau \cdot G,$$

или в штуках

$$n = M / m,$$

где m - масса одной отливки слитка, кг.

Определяем площадь, которую займут n отливок, м^2

$$F_{\text{м}} = n \cdot f,$$

где f - площадь поддона, занимаемая одной отливкой, м^2 .

Уточняем напряжение пода $P = G / F_{\text{м}}$ и сравниваем значения P и $P_{\text{п.ср}}$. Расхождение в значениях ($P_{\text{п.ср}} - P$) не должно превышать 10 % от P . В противном случае необходимо пересчитать время нагрева отливок.

Далее компоуем отливки на поддоне и уточняем ширину $B'_{\text{м}}$ и длину $L'_{\text{м поддона}}$.

Принимаем окончательные значения размеров рабочего пространства печи B , L и H .

Поскольку при температурах печи до 1200 – 1400 °С рекомендуется использовать двухслойную футеровку, назначаем материал для огнеупорной кладки и тепловой изоляции. Это может быть, например, шамот класса А толщиной 0,115 м и диатомитовый кирпич, толщиной 0,3 м. Возможны и другие варианты футеровки.

2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПЕЧИ

Мощность печи вычисляем по формуле, кВт

$$P_{\Sigma} = Q_{\text{общ}} \cdot K, \quad (2)$$

где $Q_{\text{общ}}$ - общий расход тепла, кВт, $Q_{\text{общ}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{т.к.з}}$; $Q_{\text{пол}}$ - тепло, затраченное на нагрев отливок (слитков), кВт; $Q_{\text{пот}}$ - сумма потерь тепла теплопроводностью через кладку, излучением через окна, с охлаждающей водой и т.п., кВт; $Q_{\text{т.к.з}}$ - потери на тепловые короткие замыкания (допускается в расчетах принимать равными 70% от потерь тепла теплопроводностью через кладку); K - коэффициент запаса мощности, учитывающий возможность падения напряжения сети против номинального значения, увеличение сопротивления нагревателей с течением времени («старение» нагревателей) и т.п.; $K = 1,2 - 1,3$ для непрерывно работающих печей; $K = 1,4 - 1,5$ для периодически работающих печей.

Расход тепла на нагрев металла в печи, Вт

$$Q_{\text{пол}} = \frac{G}{3600} \cdot c_{\text{м}} (t_{\text{м}}^{\text{кон}} - t_{\text{м}}^{\text{нач}}),$$

где $c_{\text{м}}$ - средняя теплоемкость металла отливок, Дж/(кг·К).

Потери тепла теплопроводностью через кладку печи при стационарном режиме работы определяем по формуле, Вт,

$$Q_{\text{пот}} = (t_{\text{п}} - t_{\text{о}}) \cdot F_{\text{нар}} \left/ \left(\frac{S_{\text{о.кл}}}{\lambda_{\text{о.кл}}} + \frac{S_{\text{тепл}}}{\lambda_{\text{тепл}}} + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \quad (3)$$

где $t_{\text{п}}$ - температура внутренней поверхности кладки, принятая равной температуре газов в рабочем пространстве печи $t_{\text{г}}$, °С; $t_{\text{о}}$ - температура окружающего воздуха (20 °С); $S_{\text{о.кл}}$ - толщина слоя огнеупорной кладки, м; $S_{\text{тепл}}$ - толщина слоя теплоизоляции, м; $\lambda_{\text{о.кл}}$, $\lambda_{\text{тепл}}$ - коэффициенты теплопроводности соответственно огнеупорной кладки и слоя теплоизоляции, Вт/(м·К); α - коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности кладки в окружающую среду, $\alpha = 11,63$ Вт/(м²·К); $F_{\text{нар}}$ - наружная поверхность печи, м².

Принимаем толщину слоев кладки всех стен, пода и свода печи одинаковыми. Значения коэффициентов теплопроводности большинства материалов для конкретных температурных интервалов в справочной литературе представлены в виде эмпирического уравнения

$$\lambda = a + b \cdot t,$$

где a и b - постоянные для данного температурного интервала величины; t - средняя температура материала в указанном интервале.

Например, для шамота $\lambda_{\text{ш}} = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} t_{\text{о.кл}}$, Вт/(м·К); для диатомита $\lambda_{\text{д}} = 0,145 + 0,134 \cdot 10^{-3} t_{\text{тепл}}$, Вт/(м·К).

Средняя температура слоя огнеупорной кладки, °С,

$$t_{\text{о.кл}} = t_{\text{п}} + t' / 2. \quad (4)$$

Средняя температура слоя теплоизоляции (считая температуру наружной поверхности, равной температуре окружающего воздуха, т.е. $t_{\text{нар}} = t_0$), °С,

$$t_{\text{тепл}} = t' + t_0 / 2, \quad (5)$$

Где t' - температура на границе раздела слоев, °С.

Температуру t' находим исходя из допущения, что тепло передается через кладку в стационарном режиме. Следовательно,

$$\frac{\lambda_{\text{о.кл}}}{S_{\text{о.кл}}} (t_{\text{п}} - t') = \frac{\lambda_{\text{тепл}}}{S_{\text{тепл}}} (t' - t_0),$$

После подстановки известных величин приведем данное уравнение к виду

$$a(t')^2 + b(t') + c = 0$$

и найдем t' .

Далее по формулам (4) и (5) определяем средние температуры огнеупорной кладки и теплоизоляции $t_{\text{о.кл}}$ и $t_{\text{тепл}}$. По полученным значениям средних температур $t_{\text{о.кл}}$ и $t_{\text{тепл}}$ находим искомые значения коэффициентов теплопроводности материалов кладки и теплоизоляции. Потери тепла теплопроводностью через кладку рассчитываем по формуле (3). Потери тепла на тепловые короткие замыкания принимаем равными 70 % от потерь тепла через кладку, Вт,

$$Q_{\text{т.к.з}} = 0,7 \cdot Q_{\text{пот}}.$$

Общий расход тепла в печи, кВт

$$Q_{\text{общ}} = (Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{т.к.з}}) / 1000.$$

Мощность печи находим по формуле (2). Завершаем тепловой расчет определением коэффициента полезного действия печи

$$\eta = (Q_{\text{пол}} / Q_{\text{общ}}) \cdot 100\% \quad (6)$$

Значения коэффициента полезного действия вновь проектируемых промышленных печей данного типа не должны быть менее 72 - 77%. Если значение η , полученное по формуле (6), меньше указанной величины, необходимо либо изменить толщину либо материал теплоизоляции, либо добавить дополнительный слой теплоизоляции, например, из речного песка, асбеста и др. В этом случае необходимо внести соответствующие изменения в формулу (3) и повторить расчет.

3. РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

Исходные данные для расчета нагревателей электропечей сопротивления : мощность печи P_{Σ} , кВт, геометрические размеры рабочего пространства печи, напряжение питающей сети U_c , В, начальная $t_m^{\text{нач}}$ и конечная $t_m^{\text{кон}}$ температуры нагрева отливок (слитков), °С.

Целью расчета нагревателей является определение геометрических размеров, схемы включения («Звезда» или «треугольник») и расположения нагревателей в печи, обеспечивающих при выбранном материале нагревателей оптимальные условия их службы.

Нагреватели рассчитываем в следующей последовательности:

1. Находим рабочую температуру нагревателя по формуле, °С,

$$t_n = t_m^{\text{кон}} + 100$$

2. По данным табл. П1 приложения выбираем материал нагревателей и определяем величину удельного электросопротивления ρ , Ом·м.

3. Рассчитываем удельную поверхностную мощность идеального нагревателя, кВт/м².

$$W_{\text{ид}} = C_0 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m^{\text{кон}}}{100} \right)^4 \right] / \left(\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_n} - 1 \right),$$

где ϵ_n , ϵ_m - соответственно степень черноты нагревателя и изделия находим по данным табл. П2 приложения; T_n , $T_m^{\text{кон}}$ - температура нагревателя и конечная температура нагрева металла изделия, К; C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

4. Выбираем тип нагревателя.

5. Определяем удельную поверхностную мощность реального нагревателя по формуле, кВт/м²,

$$W = \alpha W_{\text{ид}}, \quad (7)$$

где α - поправочный коэффициент (α находим по табл.П3 приложения либо по графику (рис. 1).

6. Принимаем схему электрического соединения нагревателей и находим величину фазового напряжения:

- при схеме соединения «треугольник»

$$U_{\phi} = U_c;$$

- при схеме соединения «звезда»

$$U_{\phi} = U_c / \sqrt{3}$$

7. Зная величины P , U_{ϕ} , ρ и W , рассчитываем геометрические размеры нагревателей по формулам (8) - (11) для металлических нагревателей или находим необходимое число нагревателей из SiC.

Расчеты нагревателей этих групп различны и будут рассмотрены отдельно.

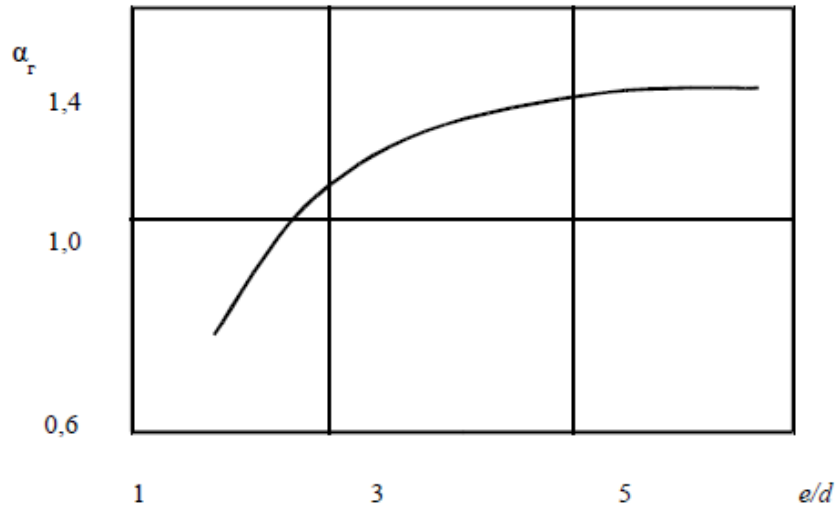


Рис. 1. Значение коэффициента α для карборундовых нагревателей (l/d - соотношение шага нагревателей к их диаметру)

3.1. Расчет металлических нагревателей

Проводим вычисления по п.п. 1 - 3.

Определяем тип нагревателя. В современных электропечах сопротивления обычно используют три типа нагревательных элементов: проволочные зигзагообразные, проволочные спиральные и ленточные зигзагообразные (рис. 2).

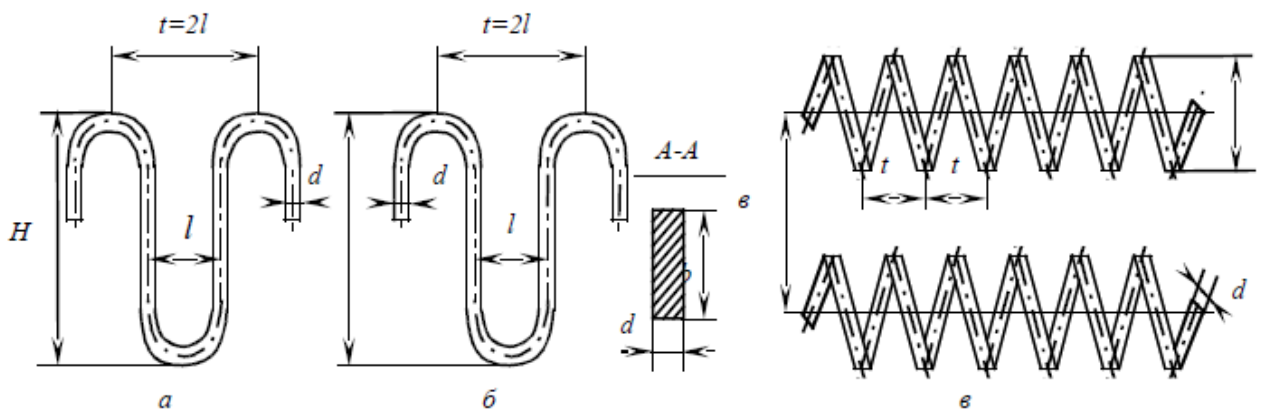


Рис. 2. Эскизы нагревателей:
 а - проволочного зигзагообразного; б - ленточного зигзагообразного; в – проволочного спирального

Тип нагревателя ориентировочно выбирают по значению относительной мощности стен печи $P_{ст.отн}$ (табл. П4 приложения)

$$P_{ст.от} = \frac{P}{F_{ст} W_{ид}},$$

где P - мощность нагревателя, приходящаяся на данную стенку, кВт; $F_{ст}$ - площадь поверхности стены (свода или пода), на которой предполагается разместить нагреватели, м².

Если полученному значению относительной мощности стен соответствуют несколько типов нагревателей, то следует выбрать проволочный зигзагообразный нагреватель.

В зависимости от типа выбранного нагревателя и условий нагрева по табл. П3 приложения находят коэффициент α , позволяющий по формуле (7) найти удельную поверхностную мощность W нагревателя выбранного типа.

Далее по значениям мощности печи или зоны (стенки) P , напряжению питающей сети U_c и удельному сопротивлению выбранного нагревателя ρ находим геометрические размеры нагревателя из следующих соотношений.

Проволочный нагреватель:

- диаметр

$$d = \sqrt[3]{4 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot P^2 / (\pi^2 U_{\phi}^2 W)}; \quad (8)$$

- длина

$$l = 0,1 \sqrt[3]{2,5 \cdot P \cdot U_{\phi}^2 / (\pi \cdot \rho \cdot W^2)}. \quad (9)$$

Ленточный нагреватель с соотношением сторон $b/a = m$

$$a = \sqrt[3]{10^3 \cdot \rho \cdot P^2 / [2m(m+1)U_{\phi}^2 W]}, \quad (10)$$

- длина

$$l = 0,1 \sqrt[3]{2,5 \cdot P \cdot U_{\phi}^2 \cdot m / [(m+1)^2 \cdot \rho \cdot W^2]}. \quad (11)$$

Производим размещение нагревателей в рабочем пространстве печи с учетом рекомендаций табл. П5 и П6 приложения и рис. 2, а также практически установленными рациональными соотношениями.

Ленточные нагреватели: $(l/d)_{opt} = 1,4 - 2,6$.

Высота зигзага H при расположении нагревателя на стене равна 150 - 160 мм, на своде и поду не более 250 мм.

Проволочный зигзагообразный нагреватель: $l/d \geq 2,75$. Оптимальное значение $(l/d)_{opt} = 3,2 - 4,8$.

Проволочный спиральный нагреватель: $t/d \geq 2,0$. Оптимальное значение $(t/d)_{opt} = 2,5 - 4,5$, $D = (6 - 8)d$ для нихрома и $D = (4 - 6)d$ для железохромоалюминиевых сплавов.

3.2. Расчет карборундовых нагревателей

Карборундовые нагреватели SiC применяют в тех случаях, когда необходимо иметь температуру нагревателя 1250 - 1450 °С. Наиболее распространенными типами карборундовых нагревателей являются цельные (тип КНМ) и составные нагреватели (тип КНС). Основные сведения о карборундовых нагревателях приведены в табл. П6 приложения.

В печи нагреватели можно располагать вертикально или горизонтально.

Особенностью расчета карборундовых нагревателей является необходимость определения ступеней напряжения питающего трансформатора таким образом, чтобы при переключении ступеней в процессе старения нагревателя мощность печи не была бы больше допустимой и меньше заданной.

Последовательность расчета нагревателей аналогична предыдущему случаю, и допустимая удельная поверхностная мощность определяется так же, как и в случае расчета металлических нагревателей. Мощность P одного нагревателя находят по формуле

$$P = W \cdot f_{\text{раб}},$$

где $f_{\text{раб}}$ - площадь наружной поверхности рабочей части нагревателя, м² (табл. П7 приложения).

Небольшой дополнительной мощностью, выделяемой в токопроводах, обычно пренебрегают. Падение напряжения на одном нагревателе

$$U = \sqrt{10^3 PR}, \quad (12)$$

где R - сопротивление нагревателя, Ом.

Поскольку сопротивление нагревателей колеблется в широких пределах в неработавших нагревателях, а также сильно меняется в процессе эксплуатации, необходимо определить верхний и нижний пределы изменения напряжения. Для определения нижнего предела в формулу (12) подставляем меньшее значение сопротивления (табл. П6 приложения). Верхний предел напряжения определяем по большему значению сопротивления и увеличиваем в 2,5 - 3 раза для учета старения нагревателя, возможного падения напряжения питающей сети и выделения мощности в выводах нагревателей.

Зная заданную мощность печи и мощность одного нагревателя, необходимо определить общее число нагревателей. Затем, выбирая схему включения нагревателей (параллельное или последовательное) и ориентируясь на напряжения, необходимые для питания одного нагревателя, определяем верхнюю и нижнюю ступени напряжения трансформатора. После этого устанавливаем необходимые промежуточные ступени напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а П I

Характеристики материалов, применяемых
для изготовления нагревательных элементов

Материал, марка	Предельная рабочая температура, °С	Плотность при 0°С, кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление ρ , кг/м ³
Сталь Х25Н20 С2	800	7840	$0,95 \cdot 10^{-6} + 38 \cdot 10^{-11} t$
Сталь Х23Н18	800	7800	$0,9 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 10^{-11} t$
Нихром Х15Н60	950	8300	$1,1 \cdot 10^{-6} + 14 \cdot 10^{-11} t$
Нихром Х20Н80	1100	8400	$1,1 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-11} t$
Фехраль Х13Ю4	700	7400	$1,26 \cdot 10^{-6} + 6 \cdot 10^{-11} t$
Сплав ОХ23Ю5А	1150	7270	$1,4 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-11} t$
Сплав ОХ27Ю5А	1250	7190	$1,4 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-11} t$
Глобар (силит)	1400	2300*	$8 \cdot 10^{-4} - 19 \cdot 10^{-4}$
Дисилицид молибдена	1650	-	$3,2 \cdot 10^{-6} - 4,0 \cdot 10^{-6}$

* - объемная масса.

Т а б л и ц а П 2

Степень черноты различных веществ

Материал	Тем- пера- тура, °С	Сте- пень черно- ты,ε	Материал	Тем- пера- тура, °С	Сте- пень черно- ты,ε
Динасовый кирпич	1100	0,8	Медь расплавленная	1220	0,12
Шамотный кирпич глазурованный	1100	0,75	Никелевая проволока	1000	0,186
Шамот	1230	0,59	Стальное литье полированное	1000	0,55
Магнезитовый кирпич	1500	0,39	Сталь окисленная шероховатая	370	0,97
Карборунд	1400	0,85	Сталь нержавеющая после прокатки	700	0,45
Силиманитовый кирпич	1500	0,29	Сталь хромоникелевая	500	0,35
Алюминий шероховатый	26	0,057	Хромоникель	1035	0,76
Алюминий окисленный	600	0,19	Чугунное литье	750	0,90
Железо литее необработанное	1100	0,9	Чугун окисленный	250	0,95
Латунь прокатанная	22	0,06	Асбестовый картон	24	0,96
Латунь окисленная	400	0,60	Кварц плавный шероховатый	22	0,93
Медь окисленная	600	0,55	Алюминиевая краска, нагретая до 325°С	300	0,35

Т а б л и ц а ПЗ

Коэффициент α при нагреве материалов с различной степенью черноты поверхности (при $P_{\text{пот}}/P = 0,25$)

Тип нагревателя	Степень черноты				
	$\varepsilon = 0,8$ (сталь окисленная)	$\varepsilon = 0,7$ (медь окисленная)	$\varepsilon = 0,6$ (латунь)	$\varepsilon = 0,45$ (сталь неокисленная)	$\varepsilon = 0,3$ (алюминий)
Ленточный зигзагообразный	0,46	0,47	0,48	0,51	0,54
Плоский ленточный зигзагообразный	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81
Проволочные спирали открытые и на трубах	0,465	0,47	0,475	0,49	0,505
Ленточный зигзаг в пазу	0,44	0,45	0,46	0,495	0,535
Проволочная спираль в пазу	0,31	0,315	0,325	0,34	0,355
Ленточный зигзаг на керамической полочке	0,41	0,425	0,435	0,47	0,50
Проволочная спираль на керамической полочке	0,33	0,40	0,41	0,44	0,47

Т а б л и ц а П4

Относительная мощность стен печи $P_{\text{ст.отн}}$

Тип нагревателя	$P_{\text{ст.отн}}$
Ленточный зигзагообразный	0,90 - 0,95
Плоский ленточный зигзагообразный	0,95 - 1,0
Проволочный спиральный	0,90 - 0,95
Ленточный зигзаг в пазу	0,70 - 0,75
Проволочная спираль в пазу	0,75 - 0,80
Ленточный зигзаг на полочке	0,60 - 0,65
Проволочная спираль на полочке	0,65 - 0,70
Проволочная спираль на трубке	0,95 - 1,0

Т а б л и ц а П 5

Максимальные и оптимальные длины и поверхности
ленточного нагревателя, размещенные на 1 м² футеровки

Сече- ние, мм ²	$e/b = 2,0$		$e/b = 9,0$		Сече- ние, мм ²	$e/b = 2,0$		$e/b = 9,0$	
	$l_{\text{опт}},$ м	$F_{\text{опт}},$ м ²	$l_{\text{макс}},$ м	$F_{\text{макс}},$ м ²		$l_{\text{опт}},$ м	$F_{\text{опт}},$ м ²	$l_{\text{макс}},$ м	$F_{\text{макс}},$ м ²
2x10	38	0,915	84	2,02	2,2x30	12,5	0,805	25*	1,61**
1,5x15	25	0,825	55,5	1,83	2,5x30	12,5	0,813	25*	1,62**
2x15	25	0,860	55,5	1,89	3,0x30	12,5	0,825	25*	1,68**
2,2x20	19	0,845	42	1,87	2,2x30	10,5	0,802	19*	1,45**
2,5x20	19	0,855	42	1,89	2,5x36	10,5	0,808	19*	1,46**
3,0x20	19	0,875	42	1,93	3,0x36	10,5	0,820	19*	1,48**
2,2x25	15	0,815	33,5	1,82	2,2x40	9,5	0,802	21	1,77
2,5x25	15	0,825	33,5	1,85	2,5x40	9,5	0,807	21	1,78
3,0x25	15	0,840	33,5	1,88	3,0x40	9,5	0,818	21	1,80

* - $e/b = 1,0$; ** - $e/b = 1,1$

Т а б л и ц а П 6

Максимальные и оптимальные длины и поверхности
проволочного нагревателя, размещенные на 1 м² футеровки

Диаметр, мм	Зигзагообразный нагреватель								Спиральный нагреватель			
	на ребристых плитках при шаге ребер				на крючках при <i>e/b</i>				на полочках при <i>t/b</i>			
	12,5 мм		17 мм		2,75 мм		3,5 мм		2		4	
	<i>l</i> _{max} , М	<i>F</i> _{max} , М ²	<i>l</i> _{opt} , М	<i>F</i> _{opt} , М ²	<i>l</i> _{max} , М	<i>F</i> _{max} , М ²	<i>l</i> _{opt} , М	<i>F</i> _{opt} , М ²	<i>l</i> _{max} , М	<i>F</i> _{max} , М ²	<i>l</i> _{opt} , М	<i>F</i> _{opt} , М ²
4	70	0,88	50	0,625	-	-	-	-	20	2,46	100	1,23
4,5	70	0,99	50	0,703	-	-	-	-	0	2,46	90	1,23
5	70	1,1	50	0,780	-	-	-	-	18	2,46	85	1,23
5,6	-	-	50	0,875	-	-	-	-	0	2,46	70	1,23
6,3	-	-	50	0,985	-	-	38	0,745	16	2,46	62,5	1,23
7	-	-	-	-	43	0,950	34	0,745	0	2,46	57,5	1,23
8	-	-	-	-	38	0,950	30	0,745	14	2,46	50	1,23
9	-	-	-	-	34	0,950	27	0,745	0	-	-	-
10	-	-	-	-	30	0,950	24	0,745	12	-	-	-
11	-	-	-	-	27	0,950	21	0,745	5	-	-	-
12	-	-	-	-	25	0,950	20	0,745	11	-	-	-
13	-	-	-	-	23	0,950	18	0,745	5	-	-	-
14	-	-	-	-	21	0,950	17	0,745	10	-	-	-
15	-	-	-	-	20	0,950	16	0,745	0	-	-	-
16	-	-	-	-	19	0,950	15	0,745	-	-	-	-
17	-	-	-	-	18	0,950	14	0,745	-	-	-	-
18	-	-	-	-	17	0,950	13,5	0,745	-	-	-	-
19	-	-	-	-	16	0,950	12,5	0,745	-	-	-	-
20	-	-	-	-	15	0,950	12,0	0,745	-	-	-	-

Таблица П7

Основные характеристики карборундовых нагревателей

Назначение	Тип нагревателя	Размеры				Площадь поверхности рабочей части Сраб x10 ⁴ , м ²	Полное сопротивление в нагретом состоянии, Ом
		длина рабочей части, м	общая длина, м	диаметр рабочей части, мм	диаметр выводов, мм		
Промышленные	КНС-25/406	0,30	0,406	25	-	236	0,77-1,75
	КНС-25/440	0,30	1,12	25	25	236	1,1-1,55
	КНС-25/540	0,40	1,22	25	25	314	1,2-1,8
	КНС-25/711	0,56	0,711	32	-	564	1,1-2,8
	КМВ-25/640	0,40	0,64	25	-	314	1,1-2,0
Лабораторные	КНМ-8x100x270	0,10	0,27	8	14	25,1	1,0-2,0
	КНМ-8x150x270	0,15	0,27	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8x150x320	0,15	0,32	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8x150x450	0,15	0,42	8	14	37,8	1,5-3,0
	КНМ-8x180x300	0,18	0,30	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8x180x350	1,18	0,35	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8x180x400	1,18	0,40	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8x180x480	1,18	0,48	8	14	45,2	1,8-3,6
	КНМ-8x200x500	0,20	0,50	8	14	50,2	2,0-4,0
	КНМ-8x250x450	0,25	0,45	8	14	62,8	2,5-5,0
	КНМ-12x250x750	0,25	0,75	12	18	94,2	1,5-3,0
	КНМ-14x300x250	0,30	0,80	14	23	132	1,75-3,5
	КНМ-14x300x250	0,20	0,28	12	-	75,4	4,4-9,0
	КНЛ-12/280	0,23	0,32	12	-	86,5	4,5-9,0
	КНЛ-12/320	0,23	0,32	16	-	115	4,5-9,0
	КНЛ-16/320	0,20	0,35	55/40	55	327	1,0-2,8
ТН-55/40x200x75							

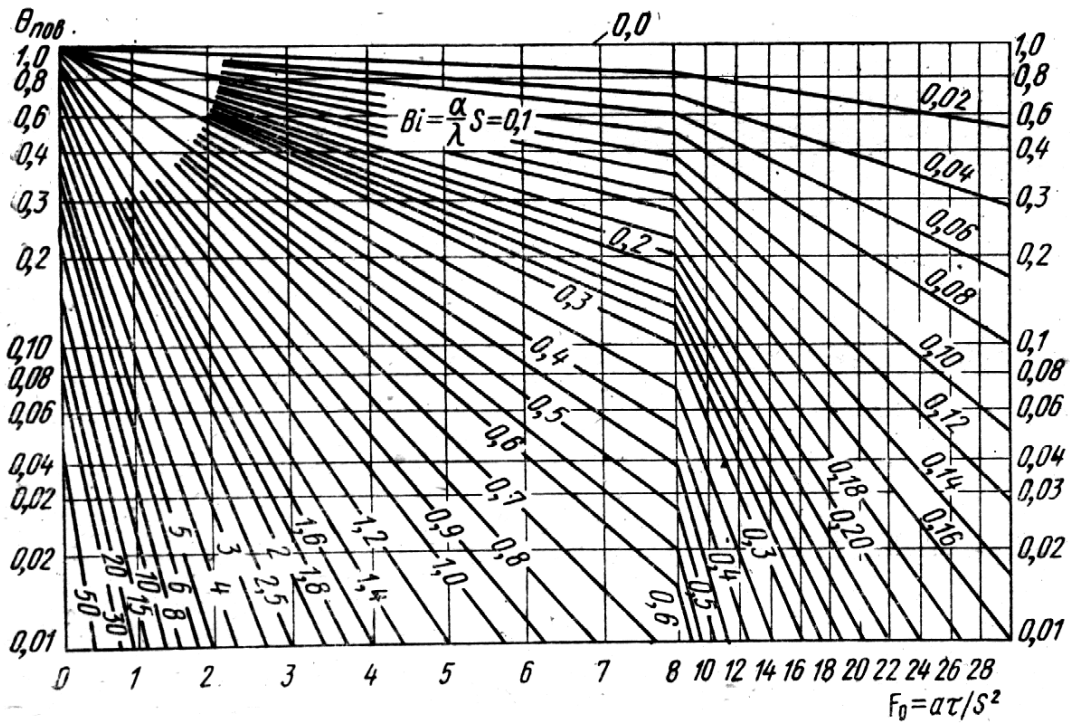
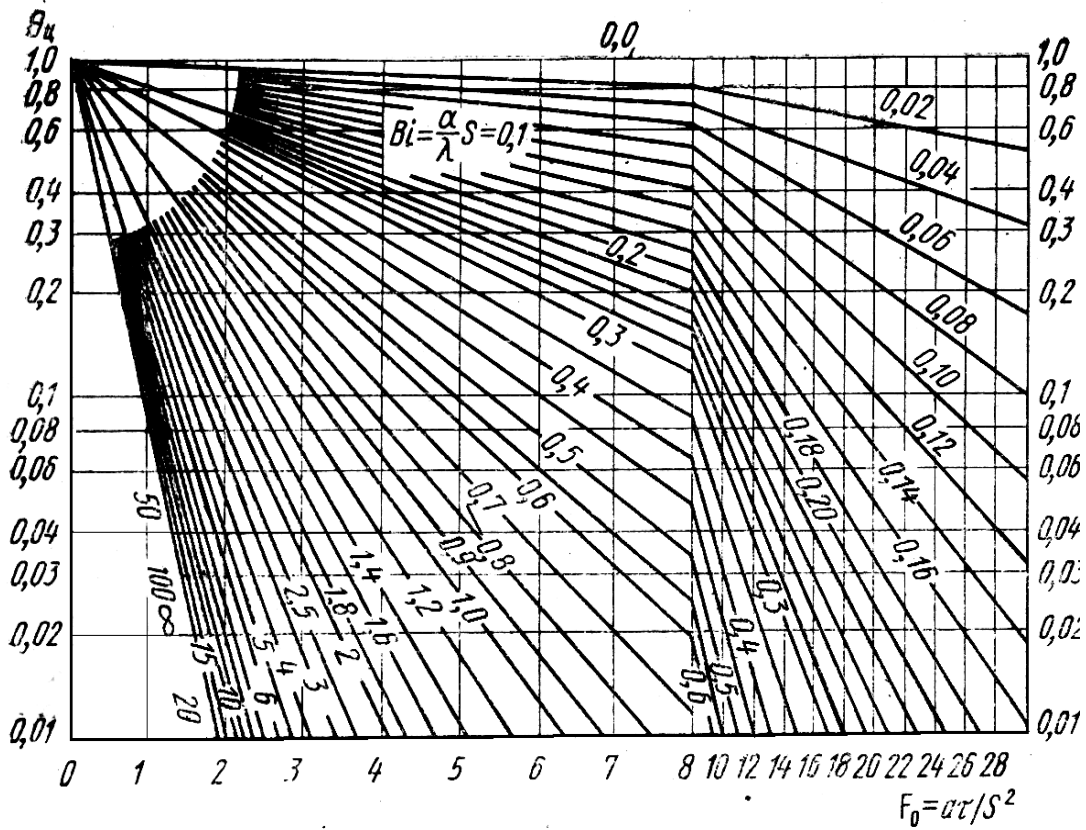


Рис.П1.Номограмма для расчета нагрева или охлаждения поверхности



СЛИТКОВ.

Рис.П2.Номограмма для расчета нагрева или охлаждения центров
СЛИТКОВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная:

1. Теплообмен: Учебное пособие/Кудинов А. А. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 375 с. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=463148>.
2. Теплотехника: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 424 с. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=486472>.
3. Теплотехнические расчеты тепловых установок [Электронный ресурс]: методические указания/ — Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.— 82 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22629>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.
4. Васильев В.Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса [Электронный ресурс]: учебник для вузов/ Васильев В.Н., Куцаков В.Е., Фролов С.В.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: ГИОРД, 2013.— 224 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20188>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
5. Печи литейных цехов [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/ Маляров А.И. — Электрон. текстовые данные.— М.: Машиностроение, 2014.— 256 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47634>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю. Гриф УМО.

Дополнительная:

1. Инкин А.И. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения [Электронный ресурс]: монография/ Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013.— 202 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45204>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.
2. Кудинов И.В. Теоретические основы теплотехники. Часть II. Математическое моделирование процессов теплопроводности в многослойных ограждающих конструкциях [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Кудинов И.В., Стефанюк Е.В.— Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.— 422 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22627>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
3. Бегляров А.Э. Основы проектирования тепловых установок [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Бегляров А.Э.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский

государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2015.— 207 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/40576>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.

4. Титков В.В. Физические основы расчета тепловых процессов в электроэнергетическом оборудовании [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Титков В.В.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2011.— 173 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43982>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.

5. Фетисов И.Н. Измерение температуры по тепловому излучению тела [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе К-61 по курсу общей физики/ Фетисов И.Н.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2012.— 28 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31406>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.

6. Коротченко А.Ю. Определение коэффициента тепловой аккумуляции формовочных и стержневых смесей [Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Теория формирования отливок»/ Коротченко А.Ю., Вербицкий В.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2010.— 15 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31484>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.

Программное и коммуникационное обеспечение:

Операционная система Windows, стандартные офисные программы.

в) периодические издания

1. Журнал «Литейщик России».
2. Журнал «Литейное производство».
3. Журнал Известия Академии наук «Металлы».
4. Журнал Известия вузов «Цветная металлургия».

Программное и коммуникационное обеспечение

<http://www.de.vlsu.ru:81/umk> → Кафедра «Литейные процессы и конструкционные материалы» → (вход для зарегистрированных пользователей).

Операционная система Windows, стандартные офисные программы.

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Определение геометрических размеров печи.	3
2. Тепловой расчет печи.	6
3. Расчет нагревателей.	8
3.1. Расчет металлических нагревателей.	10
3.2. Расчет карборундовых нагревателей.	11
Приложение.	13
Библиографический список.	17

