

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовой работе по дисциплине
«Печи литейных цехов»
для студентов специальности Т.02.02 –
«Технология, оборудование и автоматизация
обработки материалов»

Минск 1999

15. Рециркуляционная печь с выкатным подом.
16. Вертикальное конвейерное сушило.
17. Конвейерное горизонтальное газовое сушило для подсушки стержней.
18. Газовое сушило для сушки песка в кипящем слое.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА АГРЕГАТОВ

I. Расчет рекуператора

Исходными данными при проектировании являются:

- а) количество нагреваемого воздуха;
- б) количество дымовых газов;
- в) состав дымовых газов;
- г) температура дымовых газов на входе в рекуператор;
- д) температура на выходе из рекуператора;
- е) материал труб.

В задачу расчета входит определение конструктивных параметров и потерь давлений.

Методика расчета.

1. Определяем секундный объем воздуха, проходящего через рекуператор:

$$V_e = \frac{\text{пункт а}}{3600}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Секундный объем дымовых газов, проходящих через рекуператор:

$$V_d = \frac{\text{пункт б}}{3600}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Количество теплоты, содержащейся в воздухе после рекуператора:

$$Q_B = V_B c_B t_B, \text{ кВт},$$

где c_B - удельная теплоемкость воздуха при t_B .

4. Тепловые потери в окружающую среду принимаем равными 10%. Определяем количество теплоты, которое дымовые газы отдают в рекуператоре:

$$Q_{перед} = \frac{Q_{в}}{0,9}, \text{ кДж}.$$

5. Определяем количество теплоты, содержащейся в дымовых газах, входящих в рекуператор. Предварительно определяем удельную теплоемкость дымовых газов.

$$c_{\partial}^H = c_{CO_2} CO_2 + c_{H_2O} H_2O + c_{N_2} N_2; \text{ кДж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C};$$

$$Q_{\partial}^H = V_{\partial}^H c_{\partial}^H t_{\partial}^H, \text{ кВт}.$$

6. Количество теплоты, содержащейся в дымовых газах, выходящих из рекуператора:

$$Q_{\partial}^K = Q_{\partial}^H - Q_{перед}.$$

7. Температура дымовых газов, уходящих из рекуператора:

$$t = \frac{Q_{\partial}^K}{V_{\partial} c_{\partial}^K}, ^\circ\text{C},$$

где c_{∂}^K - удельная теплоемкость дымовых газов, уходящих из рекуператора.

8. Принимаем в рекуператоре схему противотока. Тогда

$$\Delta t_H = t_{\partial}^H - t_K^g, ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_K = t_{\partial}^K - t_g^H, ^\circ\text{C}.$$

9. Определяем Δt_{cp} :

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

10. Принимаем скорость воздуха в рекуператоре (при 0°C) равной $5,5 \text{ м/с}$. Общее сечение каналов для прохождения воздуха будет равно

$$f_v = \frac{V_v}{\omega_v}, \text{ м}^2,$$

где V_v - секундный объем воздуха; ω_v - скорость воздуха.

11. Принимаем скорость дымовых газов в рекуператоре равной $2,5 \text{ м/с}$. Общее сечение каналов для прохождения дымовых газов будет следующим:

$$f_d = \frac{V_d}{\omega_d}.$$

12. Принимаем, что дымовые газы перемещаются внутри труб, а воздух обтекает трубы снаружи. Принимаем, что трубы для рекуператора имеют наружный диаметр 60 мм и внутренний 53 мм . Поперечное сечение одной трубы

$$f_{mp} = \frac{\pi D^2}{4}.$$

13. Число труб для прохода дымовых газов

$$n = \frac{f_d}{f_{mp}}.$$

14. Принимаем, что трубы расположены в шахматном порядке: по направлению движения воздуха n_1 рядов, а в поперечном направлении n_2 рядов. Общее число труб

$$n = n_1 \cdot n_2.$$

15. Действительная площадь для прохода дымовых газов

$$f_d = n f_{тр}.$$

16. Действительная скорость дымовых газов (при 0°C)

$$\omega_d = \frac{V_d}{f_d}.$$

17. Шаг труб (см. рис. 26 б [1])

$$S_1 = 1,5d ; S_2 = 1,3d.$$

18. Ширина каналов между трубами для прохода воздуха

$$a = S_1 - d,$$

где d - диаметр трубы.

19. Необходимая высота воздушного канала

$$b = f_a / a \cdot n_2, \text{ м}.$$

20. Средняя температура воздуха в рекуператоре

$$t_a^{cp} = \frac{t^H + t^K}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

21. Скорость воздуха при 150°C

$$\omega_a = \omega_a (1 + \alpha t), \text{ м/с}.$$

22. Определяем критерий Рейнольдса. Коэффициент кинематической вязкости ν определим из прил. 3 [1]:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}$$

23. Определяем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,37 Re^{0,6}$$

24. Коэффициент теплообмена конвекцией от пучка труб к воздуху

$$a_k = \frac{Nu \lambda}{d}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

λ - теплопроводность (прил. 3 [1]).

25. Средняя температура дымовых газов в рекуператоре

$$t_{\partial}^{cp} = \frac{t_{\partial}^H + t_{\partial}^K}{2}, \text{ °C}$$

26. Скорость дымовых газов при t_{∂}^{cp}

$$\omega_{\partial} = \omega_{\partial}^0 (1 + \alpha t_{\partial}^{cp}), \text{ м/с},$$

где ω_{∂}^0 - скорость дымовых газов при 0°С.

27. Определяем критерий Рейнольдса (ν - из прил. 3 [1]). Критерий Нуссельта определим по рис.25 [1]. Величину $Nu/Pr^{0,4}$ определяем по штриховой линии. Для определения критерия Прандтля надо найти температуропроводность a дымовых газов при t_{∂}^{cp} .

$$a = \frac{\lambda}{C_p P}$$

28. Удельная теплоемкость дымовых газов при t_a^{cp}

$$c = c_{CO_2} CO_2 + c_{H_2O} H_2O + c_{N_2} N_2.$$

Удельная теплоемкость из табл. 2 [1].

Плотность газа $\rho_0 = 1,23 \text{ кг/м}^3$.

$$c_p = \frac{c}{\rho_0}.$$

29. Фактическая плотность газа

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t}.$$

30. Теплопроводность

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

31. Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}.$$

32. Критерий Нуссельта:

$$Nu = 20 Pr^{0,4}.$$

33. Коэффициент теплообмена α

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}.$$

34. Коэффициент теплообмена в рекуператоре

$$K = \frac{\alpha_{\theta} \alpha_{\partial}}{\alpha_{\theta} + \alpha_{\partial}}, \text{ Вт(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

35. Необходимая поверхность рекуператора

$$F = \frac{Q_{\theta}}{K \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2.$$

36. Средний диаметр труб

$$d_{cp} = \frac{d_{н} + d_{в}}{2}, \text{ м}.$$

37. Необходимая длина труб

$$L = \frac{F}{\pi d_{cp} n}, \text{ м}.$$

38. По высоте воздушного канала определяем число ходов воздуха

$$N = L / b.$$

39. Определяем максимальную температуру стенки рекуператора, зная предварительно найденные величины $\alpha_{\theta}, \alpha_{\partial}, t_{\theta}^K, t_{\partial}^H$:

$$t_{cm} = t_{\theta} + \frac{t_{\partial} - t_{\theta}}{1 + \frac{\alpha_{\theta}}{\alpha_{\partial}}}, \text{ °C}.$$

По вычисленной температуре определяем допустимость применения металла, из которого изготовлены трубы для рекуператора.

40. Потери давления в рекуператоре на воздушном пути.

На воздушном пути имеются следующие сопротивления: при входе в рекуператор, в рекуператорных трубах, повороты в воздушных коробках, при выходе из рекуператора.

41. Определим сопротивление при входе в рекуператор. Скорость воздуха в подводящем трубопроводе принимаем равной 10 м/с. Отношение сечений подводящего воздухопровода F_1 и подводящей коробки в наиболее широком сечении ее F_2 принимаем равным

$$\frac{F_1}{F_2} = 0,1, \text{ угол раскрытия } \alpha = 45^\circ.$$

42. По прил. 1 [1] находим ξ , тогда потери давления

$$h_1 = \xi \frac{\omega_0^2}{2} \rho (1 + \alpha l), \text{ Н/м}^2.$$

43. Находим сопротивление пучков с шахматным расположением труб. Определяем скорость воздуха в наиболее свободном сечении пучка

$$\omega_0 = \frac{V_a}{F_a}, \text{ м/с},$$

где $F_a = nS_1 \cdot b$, м².

44. Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu},$$

где

$$d = \frac{4F}{S} = \frac{4nS_1b}{2(n_1S_1 + b)}, \text{ м}.$$

45. Определим величину коэффициента сопротивления (табл. 24 и 25 [1]).

$$\xi^1 = AB(T \frac{S_1}{S_2} C + D);$$

$$h_2 = \xi^1 \frac{\omega_0^2}{2} \rho(1 + \alpha t), \text{ Н/м}^2.$$

46. Определим сопротивление воздушных коробок. По прил. 1 [1] находим коэффициент сопротивления ξ при повороте воздуха в коробке на 90° . Имеются три коробки. В каждой из них направление потока воздуха меняется на 180° .

Общий коэффициент сопротивления

$$\xi = \xi_{1x} \xi_{2x} \xi_{3x}.$$

47. Потери давления будут

$$h_3 = \xi \frac{\omega_0^2}{2} \rho(1 + \alpha t), \text{ Н/м}^2.$$

48. Определим сопротивление при выходе из рекуператора. По прил. 1 [1] определим ξ . Температуру воздуха на выходе из рекуператора t_b . Принимаем $F_1/F_2 = 0,1$, ω_b , $\alpha = 45^\circ$. Тогда

$$h_4 = \xi \frac{\omega_0^2}{2} \rho(1 + \alpha t), \text{ Н/м}^2.$$

49. Сумма потерь давления на пути воздуха в рекуператоре

$$h_{\text{пот}} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \text{ Н/м}^2.$$

50. Определим потери давления в рекуператоре на пути дымовых газов. Имеются следующие сопротивления: при входе в рекуператор, трение о стенки труб, при выходе из рекуператора.

51. Определим потери давления при входе дымовых газов в рекуператор. По прил. 1 [1] определим ξ , ω_b , t_b тогда

$$h_1 = \xi \frac{\omega_d^2}{2} \rho (1 + \alpha t_d), \text{ Н/м}^2.$$

52. Определим потери давления от трения в трубах. Критерий Re берем из пункта 22. Коэффициент трения для шероховатой металлической стенки λ (гл. I, п. 4 [1]).

$$h_2 = \lambda \frac{\omega_d^2}{2} \rho (1 + \alpha t_d) \frac{L}{d}, \text{ Н/м}^2,$$

где L, d, ρ, ω_d определены ранее.

53. Определим потери давления при выходе дымовых газов из труб рекуператора. По прил. 1 [1] определим ξ , а также необходимое значение температуры t_d .

$$h_3 = \xi \frac{\omega_d^2}{2} \rho (1 + \alpha t_d), \text{ Н/м}^2.$$

54. Вычислим геометрическое давление. Температура окружающего воздуха принимается равной 0°C , средняя температура t_d^{cp} , высота подъема дымовых газов (длина трубы)

$$H = L.$$

55. Плотность дымовых газов при t_d^{cp} (см. п. 25).

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t_d}, \text{ кг/м}^3.$$

56. Вектор геометрического давления совпадает с направлением движения дымовых газов, поэтому в сумму потерь давления геометрическое давление войдет со знаком минус.

$$h_{\text{пот}} = h_1 + h_2 + h_3 - h_4, \text{ Н/м}^2.$$

II. Расчет вагранки

Для анализа влияния отдельных факторов (качества кокса, нагрева дутья, температуры колошниковых газов и т.д.) на удельный расход кокса и себестоимость жидкого чугуна составляют тепловой баланс вагранки.

Для составления теплового баланса предварительно делают материальный баланс. В материальном балансе устанавливают расход всех материалов и их составных частей, подвергающихся в ходе ваграночного процесса различным превращениям, при которых выделяется или поглощается тепло в вагранке, а также количество и состав продуктов горения.

Статьи прихода.

1. Шихта. Эту статью принимаем равной 100 кг.
2. Кокс. Его расходом задаются при проектировании вагранки.
3. Известняк. Его расход определяют так же, как и расход кокса.
4. Расход воздуха определяют расчетом горения кокса и окисления элементов.
5. Разгар футеровки и пригар литников. Определяются по разности расходной и приходной частей баланса.

Статьи расхода.

1. Выплавленный металл. Для расчета задаемся величиной угара таких элементов, как кремний, марганец, железо, и величиной пригара для углерода и серы.

2. Ваграночные газы.

По расходу кокса и известняка находят количество углерода в кг, перешедшее в ваграночные газы (на 100 кг шихты):

$$C_r = B_k q_c + B_{из} q_{из} \frac{M_c}{M_{CO_2}}$$

где B_k - расход кокса, кг; q_c - содержание углерода в 1 кг кокса, кг; $B_{из}$ - расход известняка, кг; $q_{из}$ - содержание CO_2 в 1 кг известняка, кг; M_c - атомная масса углерода; M_{CO_2} - молекулярная масса CO_2 .

По химическому составу колошниковых газов определяют содержание углерода в 1 м³ колошникового газа в кг/м³.

$$Cr' = \frac{CO + CO_2}{100} \frac{M_C}{22,4}$$

где CO - содержание окиси углерода в колошниковом газе, %;
CO₂ - содержание углекислого газа в колошниковом газе, %; 22,4 -
объем 1 кмоль.

Общее количество колошниковых газов на 100 кг шихты в м³

$$V_r = \frac{Cr}{Cr'}$$

Для проектируемой вагранки количество ваграночных газов определяют расчетом горения кокса и разложения известняка.

3. Шлак. Для проектируемой вагранки количество шлака находят исходя из окисления элементов, разгара футеровки, количества известняка, золы кокса и др.

На основании данных материального баланса составляем тепловой баланс.

Тепловой баланс вагранки.

Приходная часть.

1. Теплота сгорания углерода кокса при сгорании в CO₂ в кДж.

$$Q_c = V_k q_c Q'_c$$

2. Теплота, образовавшаяся с воздухом, в кДж

$$Q'_a = c_a t_a V_a$$

где c_a - удельная теплоемкость воздуха при t_a, кДж/(м³ · °C); t_a - температура воздуха при °C; V_a - объем воздуха, подаваемого в вагранку, м³.

3. Теплота, выделяемая при окислении кремния, кДж:

$$Q_{Si} = 29400 q_{Si}$$

БІВЛІЯТЭКА
Беларускай дзяржаўнай
палітэхнічнай акадэміі
ІНВ. № 1583434

где 29400 - коэффициент, показывающий величину теплового эффекта реакции горения кремния; q_{Si} - количество кремния металла, соединившегося с кислородом, кг.

4. Теплота, выделяемая при окислении марганца, в кДж

$$Q_{Mn} = 6900 q_{Mn},$$

где q_{Mn} - количество марганца, соединившегося с кислородом, кг.

5. Теплота, выделяемая при окислении железа, в кДж

$$Q_{Fe} = 4990 q_{Fe},$$

где q_{Fe} - количество железа металла, соединившегося с кислородом, кг.

6. Теплота, выделяемая при шлакообразовании, в кДж

$$Q_{шл} = 258 q_{шл}.$$

Расходная часть.

1. Расход теплоты на расплавление и перегрев металла в кДж

$$Q_m = q_m [c_{т.м} t_{пл} + c_{пл} + c_{ж.м} (t_m - t_{пл})],$$

где q_m - количество жидкого металла, полученное из 100 кг шихты, кг; $c_{т.м}$ - удельная теплоемкость металла в твердом состоянии, кДж/(кг · °С); $c_{пл}$ - скрытая теплота плавления металла, кДж/кг; $c_{ж.м}$ - удельная теплоемкость металла в жидком состоянии, кДж/(кг · °С); для серого чугуна $c_{т.м} = 0,75$ кДж/(кг · °С); $c_{пл} = 210$ кДж/(кг · °С); $c_{ж.м} = 0,88$ кДж/(кг · °С); t_m - температура металла на желобе вагранки, °С; $t_{пл}$ - температура плавления металла °С.

2. Расход теплоты на расплавление и перегрев шлака в кДж

$$Q_{шл} = q_{шл} (1,13 t_{шл} + 272),$$

где $q_{шл}$ - количество жидкого шлака, кг; $t_{шл}$ - температура шлака, °С.

3. Расход теплоты на разложение известняка в кДж

$$Q_{из} = 1620 q_{из},$$

где $q_{из}$ - количество известняка, кг.

4. Расход теплоты на испарение влаги в кДж

$$Q_{\text{вл}} = 2500 q_{\text{вл}},$$

где $q_{\text{вл}}$ - количество влаги, кДж.

5. Расход теплоты на разложение влаги в кДж

$$Q'_{\text{вл}} = 13500 q_{\text{вл}}.$$

6. Физическая теплота ваграночных газов в кДж

$$Q_{\text{ух}} = c_{\text{ух}} t_{\text{ух}} V_{\text{ух}},$$

где $c_{\text{ух}}$ - удельная теплоемкость газов при $t_{\text{ух}}$, кДж/(м³·°C); $t_{\text{ух}}$ - температура ваграночных газов при их выходе из шихты, °C; $V_{\text{ух}}$ - объем ваграночных газов, м³.

7. Расход теплоты с охлаждающей водой в кДж

$$Q_{\text{вод}} = c_{\text{вод}} (t^{\text{в}}_{\text{вод}} - t^{\text{н}}_{\text{вод}}) V_{\text{вод}},$$

где $c_{\text{вод}}$ - удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); $t^{\text{в}}_{\text{вод}}$ - температура воды после выхода из вагранки, °C; $t^{\text{н}}_{\text{вод}}$ - температура воды перед входом в вагранку, °C; $V_{\text{вод}}$ - расход воды, кг.

8. Расход теплоты за счет содержания в ваграночных газах окиси углерода (химическая теплота) в кДж

$$Q^{\text{х}}_{\text{ух}} = Q_{\text{СО}} \text{СО} V_{\text{ух}},$$

где $Q_{\text{СО}}$ - теплота сгорания окиси углерода, кДж/(м³·°C); СО - содержание окиси углерода в ваграночных газах, об. %.

9. Аккумуляция теплоты кладкой и потери теплоты через нее определяются по разности приходной и расходной частей баланса.

Расчет основных параметров вагранки.

Основные размеры вагранок рассчитывают по эмпирическим формулам, в которых отражен опыт их эксплуатации.

1. Определяем диаметр вагранки в м

$$D = 1,12 \sqrt{\frac{G}{q}},$$

где G - заданная производительность вагранки, т/ч; q - удельная производительность вагранки, т/(м²ч), определяется по рис.84 [1].

2. Определяем полезную высоту вагранки, т.е. расстояние от оси основного ряда фурм до порога загрузочного окна, в м

$$H_0 = 4,25\sqrt{D}.$$

3. Общая высота вагранки (без трубы) в м

$$H_{\text{общ}} = H_0 + H_1 + H_2,$$

где H_1 - расстояние от оси основного ряда фурм до пода, м; H_2 - расстояние от пода до пола цеха, м.

Величина H_1 колеблется от 100 (для ковкого чугуна) до 600 мм (для серого чугуна); величину H_2 принимают исходя из условий проведения ремонта. Для малых вагранок $H_2 = 1,0$ м, для больших - $H_2 = 2,0$ м.

4. Определяем высоту горна H_1 исходя из количества накапливаемого чугуна и шлака между двумя последовательными выпусками металла и шлака. Если принять, что объем пустот между кусками кокса составляет 50% всего объема горна, то высота горна в м

$$H = \frac{2}{F} \left(\frac{V_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}}} + \frac{V_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шл}}} \right) + h_1 + h_2,$$

где F - площадь поперечного сечения вагранки, м²; $V_{\text{ч}}$, $V_{\text{шл}}$ - максимальное количество чугуна и шлака, накапливаемое в горне, т; $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{шл}}$ - плотность жидкого чугуна и шлака, т/м³; h_1 - минимальное расстояние от наивысшего уровня чугуна до оси шлаковой летки, м; h_2 - расстояние от оси основного ряда фурм до оси шлаковой летки, м.

5. Диаметр металлической летки находят исходя из необходимой скорости истечения жидкого металла, определяемой высотой его уровня в вагранке:

$$d_{м.л.} = B_{ч}^{0,25} \sqrt{\frac{D}{\tau}}$$

где $d_{м.л.}$ - диаметр цилиндрической части металлической летки, мм; $B_{ч}$ - количество накапливаемого чугуна, т; D - диаметр вагранки, м; τ - продолжительность выпуска чугуна, мин.

6. Диаметр шлаковой летки принимается на 30-50 мм больше диаметра металлической летки.

7. Определяем суммарное сечение фурм основного ряда в m^2

$$F_1 = (0,1 - 0,3) F,$$

где F - сечение вагранки в свету, m^2 .

У многорядной вагранки сечения второго и третьего рядов фурм принимаем равными $0,025 F$.

8. Определяем сечение искрогасителя в горизонтальной плоскости в m^2 . Для того, чтобы из газов выпадала пыль, необходимо уменьшить скорость их движения до $1 m/s$, при этом

$$F_u = K V_a F \frac{1 + \alpha t_g}{3600}, m^2,$$

где K - коэффициент, учитывающий увеличение объема газов за счет подсоса воздуха через загрузочное окно ($K = 2-3$); V_a - количество воздуха, подаваемого в вагранку, $m^3/(m^2 \cdot \text{мин})$; F - сечение вагранки, m^2 ; α - коэффициент объемного расширения; t_g - температура газов в искрогасителе, $^{\circ}C$.

9. Определяем диаметр воздуховодов в м

$$D_a = 1,12 \sqrt{\frac{V_a}{\omega_a}}$$

где V_a - расход воздуха на вагранку (с учетом потерь в воздухопроводе), $\text{м}^3/\text{с}$; ω_a - скорость воздуха в воздухопроводе, $\text{м}/\text{с}$ (обычно принимаем $15 \text{ м}/\text{с}$).

Кожух и колонны рассчитывают на продольный изгиб, а подовую плиту и днище - на поперечный изгиб. Колонны воспринимают всю суммарную нагрузку от кожуха, футеровки, шихты, искрогасителя, включая ветровую нагрузку.

III. Расчет дуговой печи

Определяем мощность трансформатора в $\text{кВ}\cdot\text{А}$

$$S = \frac{W \cdot \Pi}{\tau_p K_u \cos \varphi},$$

где W - полезная энергия и тепловые потери за время расплавления и межплавочного простоя, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$; Π - производительность печи, $\text{т}/\text{ч}$; τ_p - продолжительность расплавления (исключая простои), с ; K_u - коэффициент использования мощности трансформатора в период расплавления; $\cos \varphi$ - коэффициент мощности печной установки.

2. Находим силу электрического тока. Вторичное напряжение выбирают с учетом мощности трансформатора, габаритных размеров печи, ее емкости и т.д. Для печей небольшой емкости - $300\text{-}400 \text{ В}$ и для печей большой емкости - до 600 В .

3. Определим силу тока на электроде печи в А

$$I_{эл} = 10^3 \frac{S}{\sqrt{3} U_{эл}},$$

где $U_{эл}$ - линейное напряжение, В .

4. Диаметр электрода, м :

$$d_{эл} = 2 \sqrt{I_{эл} / (\Pi \cdot j)},$$

где j - допустимая плотность электрического тока на электроде, $\text{А}/\text{м}^2$, $j = (15\text{-}25)10^4$.

5. Диаметр распада электродов (диаметр окружности, проходящей через центры трех электродов), м:

$$d_0 = (2,5 - 3,5) d_{эл}.$$

6. Вместимость печи, т:

$$m = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \Pi,$$

где τ_1 - время загрузки шихты в печь, ч; τ_2 - время плавки (расплавление, перегрев и доводка металла), ч; τ_3 - время слива металла из печи, ч; τ_4 - время ремонта печи после каждой плавки, ч; Π - производительность печи, т/ч.

7. Полная высота ванны (угол наклона 45°) до порога рабочего окна, м:

$$h_3 = A \cdot m^{0,25},$$

где A - коэффициент, равный для основных печей 0,31-0,345 и для кислых печей 0,38.

8. Высота сферической части ванны, м:

$$h_2 = 0,2 h_3.$$

9. Диаметр ванны на уровне порога рабочего окна, м:

$$d_1 = 0,9h_3 + \sqrt{2m / (\gamma_M h_3) - h_3^2} / h.$$

10. Диаметр плавильного пространства на уровне верхнего края откоса, м:

$$d_2 = d_1 + 2h_4.$$

где h_4 - расстояние между уровнями порога и откоса; $h_4 = (0,14 - 0,15) h_3$ для печей вместимостью до 20 т и $(0,12 - 0,13) h_3$ для печей большей вместимости.

11. Высота правильного пространства h_3 , м; для печей вместимостью до 50 т $h_3 = (0,5 - 0,4) d_2$; для печей вместимостью 100 т и выше $h_3 = (0,38 - 0,34) d_2$.

12. Толщина футеровки пода, м:

$$S = 0,5 \sqrt[3]{m}.$$

13. Толщина S_3 огнеупорного слоя стен 0,23 м для печей вместимостью 0,5-1,5 т; 0,3 м - для 3-10 т; 0,34-0,45 м - для 15-40 т. Толщина S_2 теплоизоляционного слоя стен 0,1 м для печей вместимостью 0,5-0,15 м для 3-10 т; 0,15-0,2 м - для 15-40 т.

14. Диаметр (внутренний) каркаса печи, м:

$$d_{\text{ин}} = d_2 + 2 (S_2 + S_3).$$

15. Толщина стенки каркаса печи, м:

$$S_1 = 0,005 d_{\text{ин}}.$$

16. Толщина стенки огнеупорного слоя свода 0,23 м для печей вместимостью до 12 т; 0,3 м - для 25-50 т; 0,38-0,46 м - для 100 т и выше.

17. Ширина b рабочего окна, м:

$$b = 0,3 d_2.$$

18. Высота h_1 рабочего окна, м:

$$h_1 = 0,8 b.$$

19. Стрела пролета свода, м; $h_{\text{св}} \geq 0,1 d_2$ для магнезитового кирпича и $h_{\text{св}} \geq 0,085 d_2$ для свода из динасового кирпича.

IV. Расчет индукционной тигельной печи

1. Минимальная частота питающего тока

$$f_{\text{min}} = 25 \cdot 10^6 \rho_{\text{ж}} / (\mu_{\text{ж}} d_{\text{ж}}^2),$$

где ρ_m - удельное электросопротивление металла, Ом · м; μ_m - относительная магнитная проницаемость металла; d_m - диаметр металла, м (для жидкого металла $d_m = d_0$, для металлолома d_m - средний размер куска металла).

2. Полезная вместимость тигля, т :

$$m = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \Pi + m_6,$$

где τ_1 - время загрузки шихты в печь, ч; τ_2 - время плавки, ч; τ_3 - время доводки металла, ч; τ_4 - время слива металла из печи, ч; Π - производительность печи, т/ч; m_6 - масса болота печи (при работе с болотом), т.

3. Объем жидкого металла в печи, м³:

$$V_m = m/\gamma_m,$$

где γ_m - плотность жидкого металла, т/м³.

4. Внутренний диаметр тигля

$$d_0 = 3,5 \sqrt[3]{\frac{V_m}{B}}, \text{ м.}$$

5. Высота тигля, м :

$$h_m = B \cdot d_0.$$

6. Толщина стенки S_1 тигля, мм: (0,25-0,3) d_0 до 0,5 т; (0,15-0,25) d_0 для 0,5-3 т и (0,1-0,15) d_0 свыше 3 т.

7. Толщина S_2 изоляционного слоя между тиглем и индуктором, м: 0,005 до 3т; 0,005-0,01 для 3-15 т; 0,01-0,015 свыше 15 т.

8. Внутренний диаметр индуктора, м :

$$d_m = d_0 + 2 (S_1 + S_2).$$

9. Полезная тепловая мощность печи, кВт :

$$P_{\text{печи}} = W_{\text{теп}} \Pi',$$

где $W_{\text{теор}}$ - теоретический удельный расход энергии для расплавления металла, кВт·ч/т (см. прил. 8 [2]); Π' - плавильная производительность печи, т/ч:

$$\Pi' = \Pi(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) / \tau_2.$$

10. Полезная активная мощность печи, кВт:

$$P_M = P_{\text{пол}} / \eta_{\text{терм}},$$

где $\eta_{\text{терм}}$ - термический КПД печи, равный 0,7-0,9.

11. Высота индуктора, м:

$$h_M = (0,7 - 1,3) h_m.$$

Для печей, работающих на повышенной частоте, высота индуктора больше высоты металла в тигле; для печей, работающих на промышленной частоте, она меньше высоты металла в тигле, м.

12. Глубина проникновения тока в металл, м:

$$\Delta = 503 \sqrt{\rho_M / (\mu_M \cdot f)},$$

где f - частота тока, питающего индуктор, Гц.

13. Напряженность магнитного поля в индукторе, А/м:

$$H = (10^3 / K_S) \sqrt{P_M / (6,2 d_0 h_M A_M \sqrt{\rho_M \mu_M f})},$$

где K_S - коэффициент, учитывающий самоиндукцию и взаимную индукцию между индуктором и металлом и равный 0,85-0,95; A_M - поправочный коэффициент активной мощности, учитывающий кривизну металла в тигле и зависящий от отношения диаметра к глубине проникновения тока в него, т.е. d_0 / Δ (рис. 135 [2]).

14. Реактивная мощность, выделяемая в металле, квар:

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_0 h_M R_M K_S^2 \sqrt{\rho_M \mu_M f},$$

где R_m - поправочный коэффициент реактивной мощности.

15. Реактивная мощность, выделяющаяся в зазоре между металлом и индуктором, квар:

$$Q_g = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0^2 h_m [(d_g / d_0)^2 - 1] .$$

16. Толщина стенки трубки индуктора, мм. Из условий минимальных потерь активной мощности в индукторе

$$S_m = 10^3 \cdot 1,3 \Delta .$$

17. Потери активной мощности в индукторе, кВт:

$$P_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_g h_u A_u \sqrt{\frac{\rho_u \mu_u f}{K_{з.и}}} ,$$

где ρ_u - удельное электросопротивление материала индуктора, Ом-м; μ_u - относительная магнитная проницаемость материала индуктора; A_u - поправочный коэффициент активной мощности, учитывающий кривизну индуктора. Определяют по сплошным линиям для разных $d_g / \Delta u$ (рис. 136 [2]); $K_{з.и}$ - коэффициент заполнения индуктора, равный 0,7-0,9.

18. Реактивная мощность, выделяющаяся в индукторе, квар:

$$Q_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_g h_u R_u \sqrt{\frac{\rho_u \mu_u f}{K_{з.и}}} ,$$

где R_u - поправочный коэффициент мощности, учитывающий кривизну индуктора, определяют по штриховым линиям для разных $d_g / \Delta u$ (рис. 136 [2]).

19. Общая активная мощность, кВт:

$$P = P_m + P_u .$$

20. Общая реактивная (индуктивная) мощность, квар:

$$Q = Q_M + Q_B + Q_n.$$

21. Полная мощность системы индуктор-металл, кВ·А:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

22. Сила тока в индукторе, А:

$$I = 10^3 S / U_n,$$

где U_n - напряжение на индукторе, В.

23. Число витков в индукторе, шт.:

$$n = H h_n / I.$$

24. Шаг витка индуктора, м (рис.137 [2]):

$$h_{\text{вит}} = h_n / n.$$

25. Высота трубки индуктора, м:

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{вит}} K_{2,н}.$$

26. Толщина изоляции между витками, м:

$$h_{\text{изол}} = h_{\text{вит}} - h_{\text{тр}}.$$

27. Напряжение тока между витками индуктора, В:

$$U_{\text{вит}} = U_n / n.$$

28. Напряжение на 1 см изоляции между витками, В:

$$U_1 = 10^{-2} U_{\text{вит}} / h_{\text{изол}}$$

допускается не более 200 В на 1 см.

29. Ширина трубки индуктора. Размер трубки в поперечном сечении определяют из условия, при котором плотность тока должна быть не более 20 А/мм^2 .

30. Коэффициент мощности печи

$$\cos \varphi = P / S .$$

31. Емкость конденсаторной батареи, мкФ:

$$C = 10^9 Q / (2\pi f U_c^2) ,$$

где U_c^2 - напряжение на конденсаторе, В.

Мощность конденсаторной батареи U_c , квар, должна быть равна общей реактивной (индуктивной) мощности, т.е. $Q_c = Q$. Тогда контур (индуктор-конденсационная батарея) рассчитывают на полную мощность системы S , а подводящую электрическую линию - только на общую активную мощность P .

32. Общая площадь поперечного сечения магнитопровода, м^2 :

$$F_{\text{мг}} = U_n / (4,44 f \cdot n \cdot B) ,$$

где B - индукция в магнитопроводе, В/ м^2 , при частоте 50 Гц (0,6-1).

33. Площадь поперечного сечения одного магнитопровода, см^2 :

$$F'_{\text{мг}} = 10^4 F_{\text{мг}} / N_{\text{мг}} .$$

где $N_{\text{мг}}$ - число пакетов магнитопровода вокруг индуктора.

У. Расчет канальной печи

1. Полезная тепловая мощность, передаваемая жидкому металлу, кВт:

$$P_{\text{пол}} = W_{\text{теор}} \Delta t П ,$$

где $W_{\text{теор}}$ - теоретический удельный расход энергии для перегрева металла на 1°C , кВт·ч/т (для чугуна 0,3 кВт·ч/т); Δt - температура перегрева металла в печи, $^\circ\text{C}$; $П$ - производительность печи, т/ч.

2. Активная мощность печи, кВт:

$$P = P_{\text{пол}} / \eta_{\text{терм}}$$

где $\eta_{\text{терм}}$ - термический КПД печи, равный 0,7-0,85.

3. Активная мощность индуктора, кВт:

$$P_{\text{инд}} = P / N,$$

где N - число индукторов на печи.

4. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода индуктора, см²:

$$F_{\text{ме}} = 0,3 \sqrt{10^5 P_{\text{инд}} \psi / (B j_1 f \cos \varphi)},$$

где ψ - коэффициент, учитывающий отношение массы стали магнитопровода к массе меди катушки индуктора: при воздушном охлаждении катушки $\psi = 5-25$, при водяном $\psi = 0,9-1,3$; B - магнитная индукция в стержне магнитопровода, Тл; j_1 - допустимая плотность электрического тока в катушке: при водяном $j_1 \leq 20$ А/мм²; $\cos \varphi$ - коэффициент мощности индуктора (для чугуна 0,5-0,7, для алюминия 0,35-0,5).

5. Диаметр стержня магнитопровода, мм:

$$d_{\text{ме}} = 11,3 \sqrt{F_{\text{ме}} / K_d},$$

где K_d - коэффициент заполнения окружности стержнем, $K_d = 0,78-0,88$.

6. Наружный диаметр катушки, мм:

$$d_{\text{кат}} = d_{\text{ст}} + 2 (S_z + S_{\text{кат}}),$$

где S_z - толщина зазора между стержнем магнитопровода и катушкой, $S_z = 10-20$ мм; $S_{\text{кат}}$ - толщина катушки, $S_{\text{кат}} = 20-50$ мм.

7. Внутренний диаметр канала, мм:

$$d_{\text{кан}} = d_{\text{кат}} + 2(S_1 + S_2),$$

где S_1 - толщина футеровки между каналом и катушкой, $S_1 = 65-150$ мм; S_2 - толщина зазора между катушкой и футеровкой, $S_2 = 10-30$ мм.

8. Ширина канала $b_{\text{к}}$, мм; для чугуна ширина канала 60-120 мм, для алюминия - до 150 мм.

9. Длина канала $l_{\text{к}}$, мм: построив по полученным данным эскиз индуктора, находим длину канала (по средней линии), представляющего собой часть замкнутого контура, расположенного в индукторе.

10. Площадь поперечного сечения канала, м^2 :

$$F_{\text{к}} = 10^3 P_{\text{инд}} / (j_2^2 \rho_M l_{\text{к}}),$$

где j_2 - плотность тока в канале, $\text{А}/\text{м}^2$, для меди $j_2 \leq 13 \cdot 10^6$, для латуни $j_2 \leq 9 \cdot 10^6$, для чугуна $j_2 \leq 6 \cdot 10^6$; ρ_M - удельное электросопротивление металла, $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

11. Форма поперечного сечения канала. В поперечном сечении канал может иметь форму окружности, эллипса, овала или другой фигуры, не имеющей углов. Размеры поперечного сечения канала определяют с учетом уже найденных площади поперечного сечения и ширины канала.

12. Активное сопротивление канала, Ом :

$$R = \rho_M l_{\text{к}} / F_{\text{к}}.$$

13. Индуктивность канала

$$L = L_{\text{внеш}} + L_{\text{вн}}.$$

где $L_{\text{внеш}}$ и $L_{\text{вн}}$ - внешняя и внутренняя индуктивность канала, Гн; $L_{\text{внеш}} = 2 \cdot 10^{-7} I_p l_{\text{к}} (R_1 / R_2)$, $L_{\text{вн}} = 10^{-7} l_{\text{к}} / 2$. R_1 - расстояние от оси канала до катушки плюс глубина проникновения тока в катушку; R_2 - расстояние от оси канала до поверхности канала, т.е. $R_2 = b_{\text{к}} / 2$; I_p - коэффициент, учитывающий рассеяние энергии индуктором в зависимости от индукции в стержне. При B до 1 Тл $I_p = 1$; при $B = 1,5$ Тл $I_p = 1,2$; при $B = 1,85$ Тл $I_p = 1,55$.

14. Индуктивное сопротивление канала, Ом:

$$X_L = 2 \pi f L .$$

15. Полное сопротивление канала, Ом:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} .$$

16. Коэффициент индуктивной мощности канала

$$\cos \varphi = R / Z .$$

17. Активное напряжение в канале, В:

$$U_{к.а.} = \sqrt{P_{инд} \cdot R} .$$

18. Полное напряжение в канале, В:

$$U_K = U_{к.а.} / \cos \varphi .$$

19. Полная мощность индуктора

$$S_{инд} = P_{инд} / \cos \varphi .$$

20. Реактивная (индуктивная) мощность, выделяющаяся в индукторе:

$$Q_{инд} = \sqrt{S_{инд}^2 - P_{инд}^2} .$$

21. Полная мощность печи, кВ · А:

$$S = N S_{инд} .$$

22. Реактивная (индуктивная) мощность печи, квар:

$$Q = N Q_{инд} .$$

23. Число витков катушки индуктора

$$n = U_1 / U_{\text{к}},$$

где U_1 - напряжение, подаваемое на катушку и зависящее от типа выбранного трансформатора, В.

24. Сила тока в катушке, А:

$$I_1 = S_{\text{инд}} / U_1.$$

25. Площадь поперечного сечения витка катушки, мм²:

$$F_{\text{вит}} = I_1 / j_1.$$

26. Ширина $b_{\text{вит}}$ и высота витка $h_{\text{вит}}$ катушки, мм. Размеры витка катушки определяют с учетом размеров сечения провода, из которого изготовлена катушка. В основном применяют медный провод прямоугольного сечения.

27. Длина катушки, мм:

$$l_{\text{кат}} = b_{\text{вит}} / K_{\text{сл}},$$

где $K_{\text{сл}}$ - число слоев витков в катушке.

28. Емкость конденсаторной батареи индуктора (для компенсации $\cos \varphi$), мкФ:

$$C = 10^9 Q_{\text{инд}} / (2 \pi f U_1^2).$$

VI. Расчет нагревательных печей

С помощью теплового баланса определяем расход топлива для проектируемых печей, а также анализ тепловой работы действующих печей. При этом определяем расход топлива или электроэнергии за единицу времени. Для печей непрерывного действия определяем часовой расход топлива или электроэнергии, а для печей периодического действия - период работы печи. В связи с тем, что большинство печей литейного производства - непрерывного дейст-

вия, рассмотрим методику составления теплового баланса для пламенной печи.

Тепловой баланс состоит из двух количественно одинаковых частей: прихода и расхода.

I. Приход за 1 ч.

1. Химическая теплота горения топлива в кДж

$$Q_{\text{хим}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} V ,$$

где V - искомая величина - расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$ или $\text{кг}/\text{ч}$.

2. Физическая теплота подогретого воздуха (эта статья учитывает теплоту, вносимую подогретым воздухом, который идет на горение топлива) в кДж

$$Q_{\text{в.ф.}} = c_{\text{в}} t_{\text{в}} L_{\text{н}} V ,$$

где $c_{\text{в}}$ - удельная теплоемкость подогретого воздуха при температуре $t_{\text{в}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{в}}$ - температура подогретого воздуха, $^\circ\text{C}$; $L_{\text{н}}$ - количество воздуха, необходимое для горения единицы топлива при коэффициенте расхода воздуха, равном n , $\text{м}^3/\text{м}^3$.

3. Физическая теплота подогретого топлива (имеется в виду количество теплоты на подогрев газового топлива перед сжиганием) в кДж

$$Q_{\text{т.ф.}} = c_{\text{т}} t_{\text{т}} V ,$$

где $c_{\text{т}}$ - удельная теплоемкость газового топлива при температуре $t_{\text{т}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{т}}$ - температура подогрева газового топлива, $^\circ\text{C}$.

4. Теплота, выделяемая при окислении металла (процесс окисления протекает с положительным тепловым эффектом), Вт.

$$Q_{\text{окт}} = 1570 G_{\text{м.т.}} \delta ,$$

где $G_{\text{м.т.}}$ - количество металла, включая тару, проходящее через печь в течение одного часа, кг; δ - угар металла, % (для нагревательных печей $\delta = 2\%$, для термических $\delta = 1\%$).

При нагреве металла до $600-700^\circ\text{C}$ этой статьей прихода можно пренебречь.

II. Расход за 1 ч.

1. Теплота в кДж, идущая на нагрев металла:

$$Q_m = c_m(t_m^k - t_m^n) G_m,$$

где c_m - средняя удельная теплоемкость металла в интервале температур $t_m^k - t_m^n$, кДж/(кг·°C); G_m - количество металла, нагреваемого в течение одного часа, кг; t_m^n и t_m^k - начальная и конечная температуры металла, °C.

2. Теплота в кДж, идущая на нагрев тары (в этой статье учитывают потери теплоты на нагрев поддонов, конвейерной ленты и т.п.):

$$Q_{тар} = c_{тар}(t_{тар}^k - t_{тар}^n) G_{тар},$$

где $c_{тар}$ - удельная теплоемкость тары в интервале температур $t_{тар}^k - t_{тар}^n$, кДж/(кг·°C); $t_{тар}^n$ и $t_{тар}^k$ - начальная и конечная температуры тары, °C; $G_{тар}$ - масса тары, нагреваемой в течение 1 ч, кг.

3. Потери теплоты с уходящими продуктами горения топлива в кДж

$$Q_{yx} = c_{yx} t_{yx} V_n,$$

где c_{yx} - удельная теплоемкость продуктов горения при t_{yx} , кДж/(м³·°C); t_{yx} - температура уходящих из печи продуктов горения, °C; V_n - количество продуктов горения, получающихся при сжигании единицы топлива, при коэффициенте расхода воздуха, равном n , м³/м³.

4. Потери теплоты в кДж через стены, свод, под и заслонки печи за счет теплопроводности. Эти потери $Q_{ст}$ определяют отдельно для каждого элемента футеровки печи

$$Q_{ст} = K (t_n - t_{опр.в}) F_{ст},$$

где t_n и $t_{опр.в}$ - температура печного пространства и окружающего воздуха, °C; $F_{ст}$ - средняя площадь теплопередающей поверхности, м².

5. Потери теплоты в кДж излучением через окна и отверстия (в момент открывания заслонок печи часть теплоты теряется за счет

лучеиспускания печного пространства в окружающую среду, также имеются потери за счет лучеиспускания через технические отверстия в печи)

$$Q_{изл} = C_0 \left(\frac{T_{печи}}{100} \right)^4 F \Phi \Psi ,$$

где C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{печи}$ - средняя температура печи, К; F - площадь окна или отверстия, m^2 ; Φ - коэффициент диафрагмирования (табл.42 [1]); Ψ - доля времени, в течение которого отверстие открыто (при постоянно открытом отверстии $\Psi = 1$).

6. Потери теплоты в кДж на нагрев контролируемой атмосферы (часть теплоты теряется на нагрев ее до температуры печного пространства)

$$Q_{атм} = c_{атм} (t_{печи} - t''_{атм}) A ,$$

где $c_{атм}$ - удельная теплоемкость контролируемой атмосферы в интервале температур $t''_{атм} - t_{печи}$, кДж/($m^3 \cdot ^\circ C$); $t_{печи}$ и $t''_{атм}$ - температура печного пространства и начальная температура контролируемой атмосферы, $^\circ C$; A - расход контролируемой атмосферы, $m^3/ч$.

7. Потери теплоты с охлаждающей водой $Q_{вод}$ определяют либо на основе опытных данных, либо расчетом для каждого конкретного случая.

8. Неучтенные потери $Q_{неучт}$ обычно равны 15-20% от всех статей расхода (за исключением потерь теплоты на нагрев металла). Приравнивая сумму статей прихода сумме статей расхода, находим расход топлива B

$$Q_{хим} + Q_{в.ф.} + Q_{т.ф.} = Q_m + Q_{тар} + Q_{ух} + Q_{кл} + \\ + Q_{изл} + Q_{атм} + Q_{вод} + Q_{неучт} .$$

Данные теплового баланса сводим в следующую таблицу.

Таблица баланса газовой печи

Статьи прихода	Единица измерения		Статьи расхода	Единица измерения	
	кДж/ч	%		кДж/ч	%
Химическая теплота горения топлива $Q_{хим}$			Нагрев металла Q_m		
Физическая теплота подогретого воздуха $Q_{в.ф}$			Нагрев тары $Q_{тары}$		
Физическая теплота подогретого топлива $Q_{т.ф}$			Теплота с уходящими продуктами горения $Q_{ух}$		
			Потери теплоты через кладку $Q_{кл}$		
			Излучение через окна $Q_{мл}$		
			Нагрев контролируемой атмосферы $Q_{атм}$		
			Потери теплоты с охлаждающей водой $Q_{вод}$		
			Неучтенные потери $Q_{неучт}$		
Всего:	$Q_{пр}$	100	Всего:	$Q_{расх}$	100

С помощью теплового баланса определяют расход топлива для проектируемых печей, а также можно осуществить анализ тепловой работы действующих печей. Один из основных показателей работы печи - коэффициент полезного действия - определяют из теплового баланса

$$КПД = \frac{Q_m}{Q_{расх}} \cdot 100\%$$

Характерным показателем тепловой работы печи является удельный расход теплоты на единицу нагреваемого металла в кДж/кг

$$q = \frac{Q_n^p \cdot B}{G_m}$$

Расход топлива B определяли ранее из теплового баланса, реальный расход топлива обычно принимают равным $(1,3-1,4) B$, с учетом форсированной работы печи.

Тепловой баланс для электрических печей составляем по аналогам с тепловым балансом для газовых печей.

Расходная часть баланса электрической печи состоит из тех же статей, что и расходная часть газовой печи, исключение составляет статья расхода теплоты с уходящими газами.

Статьи теплового баланса рассчитывают в кВт.

Из составленного баланса определяют расход электроэнергии P . Установленную мощность печи $P_{\text{уст}}$ принимают завышенной, учитывая форсированный тепловой режим:

$$P_{\text{уст}} = K P,$$

где K - коэффициент запаса, учитывающий условия работы печи $(1,2-1,3$ для непрерывно работающих и $1,4-1,5$ для периодически работающих печей).

Для определения габаритных размеров нагревателя необходимо знать его допустимую удельную поверхностную мощность ω , Вт/см². Эта величина зависит от отдельных факторов, определяющих условия теплообмена нагревателя в печи: температуры и степени черноты нагреваемого материала и нагревателя, расположения последнего и т.д.

Так, для нихромовых нагревателей рекомендуют следующие величины удельной поверхностной мощности:

при температуре печи до 900°C - 1,5 Вт/см²;

при температуре печи 1000°C - 1,0 Вт/см²;

при температуре печи 1100°C - 0,7 Вт/см².

Размеры круглых нагревателей определяют по формулам:

$$d = 10 \sqrt[3]{\frac{4\rho P^2}{\pi^2 V^2 \omega}};$$

$$L = \frac{1}{10} \sqrt[3]{\frac{10PV^2}{4\rho\omega^2}};$$

где d - диаметр проволоки, м; ρ - удельное сопротивление нагревателя, 10^{-6} Ом · м; P - мощность фазы, кВт; V - фазовое напряжение, В; L - длина нагревателя для одной фазы, м.

Для ленточных нагревателей при отношении сторон ленты $b/a = m$:

$$a = 10 \sqrt[3]{\frac{\rho P^2}{2m(m+1)V^2 \omega}}$$

Длина ленточного нагревателя

$$L = \frac{1}{10} \sqrt[3]{\frac{10PV^2 m}{4(m+1)\rho\omega^2}},$$

где a и L измеряются в м. Расчетные данные относятся к одной фазе. Нагревательные элементы могут быть соединены последовательно, параллельно, звездой и треугольником.

Другой метод расчета нагревателей заключается в том, что, задаваясь размером поперечного сечения нагревателя, определяют его длину и проверяют величину ω для этого сечения. Если при этом величина ω значительно отличается от допустимой (особенно в сторону увеличения), то нагреватель еще раз рассчитывают, изменяя его поперечное сечение или расчетное напряжение.

VIII. Расчет сушил

Интенсивность процесса испарения влаги с поверхности зависит от разности парциальных давлений пара на поверхности материала

и окружающей среды. Чем больше эта разность, тем интенсивнее испарение. Количество влаги, испаряющейся с поверхности, в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

$$m = \beta (P_{\text{н}} - P_{\text{гас}}),$$

где β - коэффициент испарения, $\text{кг}/(\text{кН} \cdot \text{с})$; $P_{\text{н}}$ - парциальное давление водяных паров на поверхности испарения, $\text{кН}/\text{м}^2$; $P_{\text{гас}}$ - парциальное давление водяных паров окружающей среды (сушильного агента-газа), $\text{кН}/\text{м}^2$.

Тепловой расчет процесса сушки при заданном температурном режиме сводится к определению расхода сушильного агента и расхода теплоты на сушку данного материала. Различают абсолютную влажность, относительную влажность и влагосодержание воздуха.

Влагосодержание влажного воздуха характеризуется массой водяного пара $m_{\text{пар}}$ (кг), содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха (смеси сухого воздуха и пара), отнесенной к массе 1 м^3 сухого воздуха $m_{\text{в.с}}$ (кг). Влагосодержание обозначают буквой d .

$$d = \frac{m_{\text{пар}}}{m_{\text{в.с}}}, \text{ кг вл/кг.}$$

Влагосодержание влажного воздуха зависит от парциального давления водяного пара $m_{\text{пар}}$ (кг), содержащегося в нем, и не зависит от температуры:

$$d = 0,622 P_{\text{пар}} / (B - P_{\text{пар}}),$$

где B - барометрическое давление, кПа. В расчетах принимают $B = 98,1 \text{ кПа}$.

Из формулы

$$P_{\text{пар}} = 0,01 \varphi P_{\text{нас}}.$$

Тогда

$$d = 0,00622 \varphi P_{\text{нас}} / (98,1 - 0,01 \varphi P_{\text{нас}}),$$

Зная количество влаги, которое нужно испарить из материала за 1 с ($m_{вл}$, кг/с), а также начальное и конечное влагосодержание воздуха (d'' и d'), можно определить количество воздуха, необходимое для сушки (кг в/с):

$$m_a = m_{вл} / (d'' - d')$$

Количество влаги, которое необходимо удалить из материала в процессе сушки, зависит от начальной и конечной влажности материала. Количество влаги, удаляемое из материала, определяется по одной из двух приведенных ниже формул, применяемых в зависимости от наличия исходных данных, кг/с:

$$m_{вл} = m''_м (U' - U'') / (100 - U')$$

$$m_{вл} = m''_м (U' - U'') / (100 - U'')$$

где $m''_м$, $m'_м$ - масса материала до и после сушки, кг/с; U'' , U' - относительная влажность материала до и после сушки.

Относительная влажность материала представляет собой отношение массы влаги $m'_{вл}$, содержащейся в материале, к массе влажного материала $m''_м$:

$$U = 100 m'_{вл} / m''_м, \%$$

Отношение массы влаги, содержащейся в материале, к массе абсолютно сухого материала $m_{м\text{абс с}}$ означает абсолютную влажность материала:

$$U_{абс} = 100 m'_{вл} / m_{м\text{абс с}}, \%$$

Пересчитать одну влажность материала на другую можно по формуле

$$U = 100 U_{абс} / (100 + U_{абс})$$

В тепловых расчетах сушил в качестве одного из основных параметров используют количество теплоты влажного воздуха, отнесенное к 1 кг абсолютно сухого воздуха (кДж/кг в.с):

$$i_{\text{вл}} = 1,005 t + d (2490 + 1,97 t) .$$

Первый член выражения представляет собой удельное количество теплоты сухого воздуха, а второй - водяного пара, содержащегося во влажном воздухе.

Расчет процесса сушки аналитическим путем труден и громоздок, поэтому широко используют графический метод расчета с помощью *i-d* диаграммы [1]. Диаграмма, построенная для влажного воздуха, может быть использована для расчета сушки продуктами горения, разбавленным воздухом.

Различают теоретический (идеальный) и действительный процесс сушки.

Расход воздуха при теоретическом процессе (кг в.с/с)

$$m_{\text{в теор}} = m_{\text{вл}} / (d_2 - d^{\text{н}}) .$$

При действительном процессе сушки часть теплоты, вносимой воздухом, необратимо теряется, вследствие чего процесс идет с уменьшением удельного количества теплоты воздуха. Для определения изменения удельного количества теплоты воздуха необходимо вычислить количество теплоты $Q_{\text{пот}}$, затраченное на нагрев металла, тары и т.д.

После определения $Q_{\text{пот}}$ находим потери удельного количества теплоты воздуха, кДж/кг в.с:

$$i_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}} / m_{\text{в теор}} .$$

Затем, пользуясь *i-d* диаграммой [1], определим расход воздуха на действительный процесс

$$m_{\text{в}} = m_{\text{вл}} / (d^{\text{к}} - d^{\text{н}}) , \text{ кг в.с/с} .$$

Для перевода массы воздуха в объемное количество $V_{\text{в}}$ можно воспользоваться отношением, м³/с:

$$V_v = V_{mv},$$

где V_{mv} - объем влажного воздуха, приходящегося на 1 кг сухого воздуха (прил. 14 [1]).

Потери теплоты в сушилах $Q_{пот}$ определяют так же, как и для расчета теплового баланса печей:

$$Q_{пот} = Q_m + Q_{тр} + Q_{окр} + Q_{ух} + Q_{щил},$$

где Q_m - расход теплоты на нагрев материала; $Q_{тр}$ - расход теплоты на нагрев транспортных устройств; $Q_{окр}$ - потери теплоты в окружающую среду; $Q_{ух}$ - потери теплоты с уходящими газами; $Q_{щил}$ - потери теплоты через неплотности сушила.

Л и т е р а т у р а

1. Долотов Г. П., Кондаков Е. А. Печи и сушила литейного производства. - М.: Машиностроение, 1990.
2. Долотов Г. П., Кондаков Е. А. Конструкция и расчет заводских печей и сушил. - М.: Машиностроение, 1973.
3. Кривандин В. А., Марков Б. Л. Metallургические печи. - М.: Metallургия, 1977.
4. Мариенбах Л. М. Печи в литейном производстве. - М.: Машиностроение, 1964.
5. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А. С. Телегина. - М.: Metallургия, 1970.
6. Сушильные печи литейных цехов / Под ред. Б. Ф. Забника. - Свердловск: ЧПН, 1977.
7. Благодоров Б. П. и др. Печи в литейном производстве. Атлас конструкций. - М.: Машиностроение, 1989.
8. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца. - Киев: Техника, 1969.