

Основи теплової роботи печей. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему: „Розрахунок дугової сталеплавильної печі” для студентів ЗДІА спеціальностей 6.090401 „Металургія чорних металів”, 6.090402 „Металургія кольорових металів”, 6.090409 „Охорона праці і екологія виробництва”
/Укл. Є.А. Ткаченко, Ю.П. Петруша – Запоріжжя ЗДІА, 2004/

Укладачі:

Є.А. Ткаченко – канд. техн. наук, доцент

Ю.П. Петруша – канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск –

Завідувач кафедри автоматизації управління технологічними процесами проф. М.Ю. Пазюк

КОРОТКИЙ СЛОВНИК

бажати	- желать
великий	- большой
відновний (період)	- восстановительный (период)
вісь	- ось
вміст (тепловий)	- содержание (тепловое)
впровадження	- внедрение
втрати	- потери
вуглець	- углерод
випадок	- случай
випромінювання	- излучение
вираз	- выражение
виріб	- изделие
година	- час
густина	- плотность
деякі	- некоторые
додаток	- приложение
допоміжний	- вспомогательный
дорівнює	- равняется
електродотримач	- электрододержатель
загальний	- общий
задовольняти	- удовлетворять
залишок	- остаток
зводити	- сводить
звичайний	- обычный
зірка	- звезда
зміст	- оглавление
зовнішній	- внешний
ККД	- КПД
(коефіцієнт корисної дії)	(коэффициент полезного действия)
кольоровий	- цветной
кут	- угол
межа	- предел
мережа	- сеть
міркування	- соображение
місткість	- вместимость, емкость
міцність	- прочность
напруга	- напряжение
непогодженість(балансу)	- невязка (баланса)
непрямий	- косвенный
одержати	- получить

окисний	- окислительный
опір	- сопротивление
перемикати	- переключать
перетин	- пересечение
потужність	- мощность
початок	- начало
попередньо	- предварительно
простір	- пространство
припинити	- прекращать
припускати	- допускать
питомий	- удельный
рівень	- уровень
рідкий	- жидкий
розрахунок	- расчет
склепіння	- свод
сприятливий	- удовлетворительный
струм	- ток
твірна	- образующая
тривалість	- продолжительность
трикутник	- треугольник
укладач	- составитель
умова	- условие
уявляти	- представлять
фах	- специальность
хвилина	- минута
цегла	- кирпич
черінь	- под (печи), родит. падеж -череня
шар	- слой
шлях	- путь

ВСТУП

Задачі, які стоять перед промисловістю нашої країни, потребують подальшого впровадження прогресивних технологічних процесів.

При виробництві багатьох видів продукції збільшення ефективності і якості може бути досягнуто тільки при використанні електронагріву.

Першим етапом проектування і розробки конструкції електричної печі заданого типу є вибір розмірів її робочого простору. Після визначення розмірів робочого простору, як правило, проводять вибір розмірів та матеріалів футерівки печі. По вибраних розмірах та матеріалах печі розраховують теплові втрати, які являються складовою частиною теплового балансу електричної печі. Різного роду теплові втрати розраховуються на основі законів теплопередачі. Для орієнтування при розрахунках в додатку Д-5 наведені дані для печей, які використовує промисловість.

1. СИСТЕМА ПОЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Умовне позначення - індекс з трьох або чотирьох головних літер, декількох цифр та допоміжних літер та цифр. Перша літера означає метод нагріву:

- Д - дуговий;
- І - індукційний;
- О - опір непрямої;
- К - опір прямої;
- ЕШ - електрошлаковий;
- Е - електронний;
- П - плазмовий;

Друга літера означає метал, який виплавляється:

- А - алюміній та його сплави;
- Б - бронза;
- Г - магній;
- Д - молібден, ніобій;
- К - цирконій;
- Л - латунь;
- М - мідь та її сплави /окрім бронзи та латуні/;
- О - олово, свинець, бабіт;
- С - сталь та сплави заліза;
- Ч - чавун;
- І - титан;
- Ф - флюс;
- Ц - цинк та його сплави.

Третя літера означає конструктивні та інші особливості:

- для дугових та плазмових печей

П- поворотне склепіння;

Б - барабанні;

В – вакуумні;

- для індукційних печей

К - каналні;

І - тигельні;

В – вакуумні;

- для печей опору

І - тигельні;

К - камерні;

Б - барабанні;

- для електрошлакового переплаву

П - переплав;

В - відливка;

І - литво.

Четверта (допоміжна) літера означає:

М - міксер;

Г - гарнісажні печі;

Р - роздаточні.

Цифра після літер означає місткість в тонах. Наприклад: електропіч ІАТ - 2,5 означає, що ця електропіч індукційна, для алюмінію, тигельна, місткістю 2,5 т.

2. РОЗРАХУНКИ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

2.1 Знаходження основних розмірів плавильного простору

Ванна печі виконується сфероконічною, об'єм її повинен бути достатнім для того, щоб вмістити весь рідкий об'єм металу та шлаку. Об'єм шлаку займає приблизно 10 % об'єму металу. На рис. 1 показана форма плавильного простору сучасної печі. Вона сфероконічна з кутом $\alpha=45^{\circ}$ між твірною та віссю конуса.

Об'єм конуса, який займає рідкий метал, обмежується рівнем С, вище якого лежить рівень шлаку, а ще вище – рівень порогу робочого вікна В. Рівень відкосів череня А роблять на 40-100 мм вище рівня порогу С з тим, щоб шлак, який скачують не торкався стін печі.

Основні розміри плавильного простору печі знаходять, виходячи з її заданої місткості /вага рідкої сталі/ $G, т$

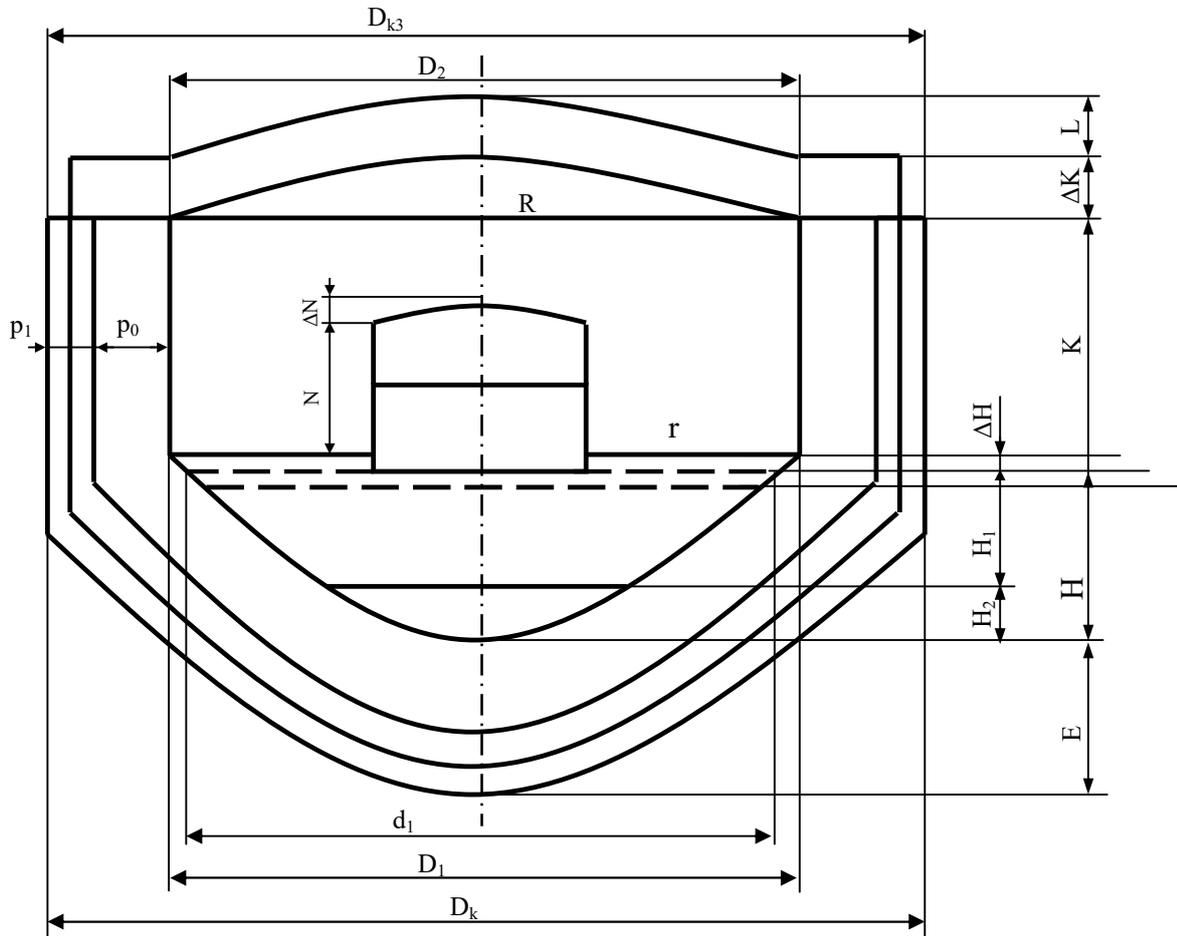


Рис.1. Форма плавильного простору ДСП

Об'єм сталі у ванні, V :

$$V = a * G, \text{ м}^3 \quad (1)$$

Де a - питомий об'єм рідкої сталі;

$$a = 0.145 \text{ м}^3/\text{т}$$

Повний об'єм ванни до порогу робочого вікна:

$$V_1 = V + \frac{b * G}{c} + e * V, \text{ м}^3 \quad (2)$$

де $b = 0,05-0,1$ – маса шлаку в долях маси сталі / кратність шлаку/;

$c = /2,8-3,2/ \text{ т}/\text{м}^3$ – густина рідкого шлаку;

$e = 0,1-0,15$ – допоміжний об'єм ванни у долях об'єму рідкої сталі.

Повна висота ванни H , м до рівня порогу робочого вікна може бути розрахована з емпіричної формули (для ванн з $\alpha=45^\circ$)

$$H = A * G^{0.25}, \text{ м} \quad (3)$$

де A – коефіцієнт, рівний $0,31$ – для невеликих печей з основною футерівкою;

0,345 – для дуже великих печей з основною футерівкою;

0,38 – для печей з кислою футерівкою.

Висота ванни складається з висоти її конусної $H_1 = 0,8H$ та сферичної $H_2 = 0,2H$ частин.

Діаметр ванни на рівні порогу робочого вікна може бути розрахований з виразу:

$$d_1 = 0.89H + \sqrt{\frac{V_1}{0.71H} - \frac{H^2}{4}}, \quad (4)$$

Діаметр плавильного простору на рівні відкосів D_1 може бути також підрахований по формулі:

$$D_1 = d_1 + 2 * \Delta H \quad (5)$$

де $\Delta H = /0,14-0,15/H$ для печей місткістю до 20 т і $/0,12-0,13/H$ - для більшої місткості.

Висота плавильного простору /від рівня відкосів до п'ят склепіння/, K , м:

$K = /0,5-0,45/D_1$ для печей місткістю 0,5-6 т;

$K = /0,45-0,40/D_1$ для печей місткістю 12-15 т;

$K = /0,38-0,34/D_1$ для печей місткістю 100 і більше т.

Верхній діаметр плавильного простору D_2 :

$$D_2 = D_1 + 2m(K - \Delta H), \text{ м} \quad (6)$$

де $m = 0,07 - 0,08$ для печей місткістю до 20 т і

$m = 0,06-0,07$ для більших печей.

Стріла склепіння K як правило приймається $/0,1-0,12/D_2$. Ширина робочого вікна M дорівнює:

$$M = p * D_1, \quad (7)$$

де $p = 0,33$ для печей місткістю до 10 т,

$0,30-0,26$ для печей місткістю 15-40 т і

$0,25-0,22$ для більших печей.

Висота робочого вікна:

$$N = (0.65 - 0.70) * M, \quad (7)$$

а стріла його арки:

$$\Delta N = (0.13 - 0.14) * M \quad (7)$$

Товщина череня E дорівнює:

$$E = (0.39 - 0.40) * \sqrt[6]{G} \quad (8)$$

З знайденого розміру на теплоізоляційний шар припадає 0,1-0,15 м для печей місткістю 0,5-1,5 т; 0,15-0,17 м для печей місткістю 3,0-10,0 т; 0,17-0,22 м для печей місткістю 15-40 т і 0,22-0,25 м для печей

місткістю більше 40 т. Залишок припадає на шар вогнетривкої цегли, та набивної частини череня.

Діаметр кожуха печі D_k перебільшує діаметр плавильного простору D_1 на подвійну товщу футеровки в основі стін:

$$D_k = D_1 + 2(P_0 + P_T) \quad (9)$$

Таблиця 1. Рекомендовані товщини вогнетривкого шару (P_0) і теплоізоляційної (P_T) футеровки стін та товщини склепіння (L)

Шар футеровки	Товщина футеровки (м) для печей місткістю, т			
	0,5-1,5	3,0-10,0	15,0-40,0	Більше 40
P_0	0.23	0.30	0.35-0.40	0.40-0.45
P_T	0.10	0.10-0.15	0.15-0.20	0.20
L	0.23	0.23	0.30	0.38-0.46

Зовнішній діаметр кожуха $D_{кз}$, з:

$$D_{кз} = D_k + 2K \quad (10)$$

де K - товщина листового заліза кожуха.

Для печей місткістю:

0,5-1,5т	$K=0,012-0,016м$
3,0-6,0т	$K=0,016-0,018м$
6,0-12,0т	$K=0,018-0,020м$
20,0-25,0т	$K=0,022-0,025м$
30,0-50,0т	$K=0,026-0,030м$

2.2 Тепловий баланс

Тепловий баланс дугової сталеплавильної печі уявляє собою порівнювання кількості підведеної енергії і витрати енергії за період плавки.

Особливістю роботи дугової сталеплавильної печі є те, що вогнетривка кладка стін та склепіння з кожною плавкою зношується і тоншає. Тому теплові втрати через стіни і склепіння рекомендується або розрахувати для двох крайніх випадків - для нової вогнетривкої кладки з початку роботи стін та склепіння і для зношеної наполовину товщини вогнетривкої кладки в кінці роботи печі, або вводити в розрахунки втрат 0,75 товщини вогнетривкої кладки /припускаючи, що до кінця кампанії кладка може зноситься на 50 % первинної її товщини/.

До футеровки череня ці рекомендації не відносяться, оскільки за умовами технологічного процесу черинь дугової сталеплавильної печі після кожної плавки заправляють свіжим вогнетривким порошком і товщина вогнетривкої частини футеровки череня за час експлуатації печі істотно не змінюється.

2.2.1 Прихід теплоти

2.2.1.1 Електроенергія, яка забирається з мережі:

$$Q_{e,e} = W, \text{ кВт*г}$$

2.2.1.2 Теплота окислення електродів $Q_{o,e}$

При згоранні 1кг вуглецю виділяється 33500 кДж теплоти і, якщо угар електродів за плавку рівняється $q_{e,l}$, тоді:

$$Q_{o,e} = 0.6 * 33500 * q_{e,l} \quad (11)$$

Коефіцієнт 0,6 враховує, що не вся теплота від горіння електродів виділяється всередині печі. Витрату електродів $q_{e,l}$ приймають для кислого процесу: вугільні електроди 10-12 кг/т рідкого металу; графітовані - 4-6 кг/т; для основного процесу: вугільні електроди 13-15 кг/т, графітовані – 6-9 кг/т.

2.2.1.3 Теплота екзотермічних реакцій $Q_{екз}$

Теплоту екзотермічних реакції можна визначити тільки металургійним розрахунком при проведенні одночасно з енергетичним матеріального балансу плавки, який дає кількісне співвідношення реагуючих елементів. Приблизно цю статтю балансу можна приймати за літературними даними - балансами аналогічних технологічних процесів, або точно розрахувати:

$$Q_{екз} = 1000G(100 * Y_c + 270Y_{si} + 72Y_{mn}), \text{ кДж} \quad (12)$$

де Y_c, Y_{si}, Y_{mn} - угар вуглецю, кремнію, марганцю, %/100

Всього прихід теплоти:

$$Q_{ee} + Q_{oe} + Q_{екз}, \text{ кВт*г} \quad (12)$$

2.2.2 Витрати теплоти

2.2.2.1 Тепловий вміст металу і шлаку.

Теплота, яка необхідна для нагріву до температури плавлення, для розплавлення і перегріву до заданої температури металу або шлаку, визначається за формулою:

$$Q_{mat} = G[C_1(t_{nl} - t_0) + q + C_2(t_{nep} - t_{nl})], \text{ кДж} \quad (13)$$

де G - маса матеріалу, кг;

C_1 - середня питома теплоємність матеріалу в інтервалі від

початкової температури до температури плавлення, кДж/(кг*К);

$t_{пл}$ - температура плавлення, °С;

t_0 - початкова температура, °С;

q - скрита теплота плавлення, кДж/кг;

c_2 - середня питома теплоємність рідкого матеріалу в інтервалі від температури плавлення до заданої температури перегріву, $t_{пер}$, °С.

2.2.2.2 Теплота ендотермічних реакцій Q_{end}

Теплоту ендотермічних реакцій визначають розрахунковим шляхом по даних матеріального балансу, як і теплоту екзотермічних реакцій, або за літературними даними.

2.2.2.3 Втрати теплоти крізь кладку

Ця стаття теплового балансу включає втрати крізь бокові «стінки» черинь і склепіння. Теплові втрати крізь циліндричну стінку можна з достатньою точністю розрахувати по рівнянню для плоскої стінки:

$$Q_{кл} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{S_1}{\lambda_1 * F_{1,2}} + \frac{S_2}{\lambda_2 * F_{2,3}} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n * F_{n,n+1}}}, \text{ кДж/Г} \quad (14)$$

де t_1 ; t_{n+1} -температура внутрішньої і зовнішньої поверхні стінки, °С;

S_1, S_2, \dots, S_n -товщина шарів стінки, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ -теплопровідність окремих шарів, Вт/(м*К), (див. табл. Д1);

$F_{1,2}, F_{2,3}, \dots, F_{n, n+1}$ - розрахункові поверхні шарів стінки, м².

Температура внутрішньої поверхні футерівки t_1 приймається рівною робочій температурі печі. Температура зовнішньої поверхні футерівки t_{n+1} приймається попередньо з послідуною перевіркою після першого орієнтовного визначення теплових втрат. Перед попереднім вибором значення t_{n+1} необхідно керуватися слідуючими міркуваннями: значення t_{n+1} буде знаходитись в інтервалі від 50 °С (при робочій температурі печі до 1000 °С і добрій теплоізоляції стінки) до 300 °С (для робочої температури 1500 °С при наявності

тільки вогнетривкої кладки без теплоізоляційного шару, наприклад, склепіння печі).

Рекомендується така послідовність розрахунків:

1. Попередньо задають температуру t_{n+1} і приймають орієнтовно значення температурних перепадів та відповідно середніх температур всіх шарів футеровки. При цьому необхідно керуватись тим, що різниця температур $t_n - t_{n+1}$ розподіляється між окремими шарами футеровки прямопропорційно тепловим опорам цих шарів.

2. За прийнятими попередніми значеннями середніх температур шарів футеровки і температури t_{n+1} визначають в першому приближенні теплопровідність $\lambda'_1 \cdot \lambda'_2 \dots \lambda'_n$ (табл. Д1) і за цим значенням знаходять попередні значення теплових опорів шарів і стінки в цілому:

$$R'_m = \sum R_{mi} = \frac{s_1}{\lambda'_1 * F_{1,2}} + \frac{s_2}{\lambda'_2 * F_{2,3}} + \dots + \frac{s_n}{\lambda'_n * F_{n,n+1}}, \text{ К/Вт} \quad (15)$$

3. Визначають максимальний тепловий потік крізь стінку з розрахунку, що вона рівна температурі повітря, що обдуває зовнішню поверхню стінки (t повітря 20°C)

$$Q_{max} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R'_m}, \text{ Вт} \quad (16)$$

і визначають максимальний питомий потік на 1 м^2 зовнішньої поверхні стін

$$q_{max} = \frac{Q_{max}}{F_p}, \text{ Вт/м}^2 \quad (17)$$

При t_{n+1} рівній температурі внутрішньої поверхні стін t_1 передача теплоти крізь стінку припиниться, $q=0$

За даними таблиці Д2 будують графік залежності питомого теплового потоку від зовнішньої поверхні в навколишнє середовище від температури цієї поверхні (крива 1, рис. 2) і на ньому наносять залежність питомого теплового потоку крізь стінку від температури зовнішньої поверхні стінки t_{n+1} , яка виразиться прямою, що з'єднає точку $[t=20^\circ, q_{max}]$ з точкою $[t_{n+1}, q=0]$ (пряма 2, рис. 2). Точка перетину дає температуру зовнішньої поверхні t_{n+1} і дійсний питомий тепловий потік.

4. Перевіряють вірність прийнятих значень теплопровідності. Так, як загальний перепад температури розподіляється по шарах пропорційно їх тепловим опорам, то для кожного шару маємо:

$$\Delta t_i = \frac{t_1 - t_2}{R'_m} * R_{Ti} \quad (18)$$

де t_1 -температура внутрішньої поверхні шару;

t_2 - температура зовнішньої поверхні шару;

R'_T - загальний тепловий опір стінки;

R_{T1} - тепловий опір 1-го шару.

Звідси визначають середні температури шарів футерівки:

$$\begin{aligned} t_{1\text{cp}} &= t_1 - 0,5 \cdot \Delta t_1 \\ t_{2\text{cp}} &= t_1 - \Delta t_1 - 0,5 \cdot \Delta t_2 \text{ і т.д.} \end{aligned} \quad (19)$$

і уточнюють значення λ .

Для уточнених значень теплопровідностей розраховують тепловий опір стінки (15) і визначають повний потік крізь стінку.

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_m}, \text{ кВт} \quad (20)$$

За плавку при її тривалості годин втрати крізь стінку становитимуть;

$$Q = Q \cdot \tau, \text{ кВт} \cdot \text{г} \quad (21)$$

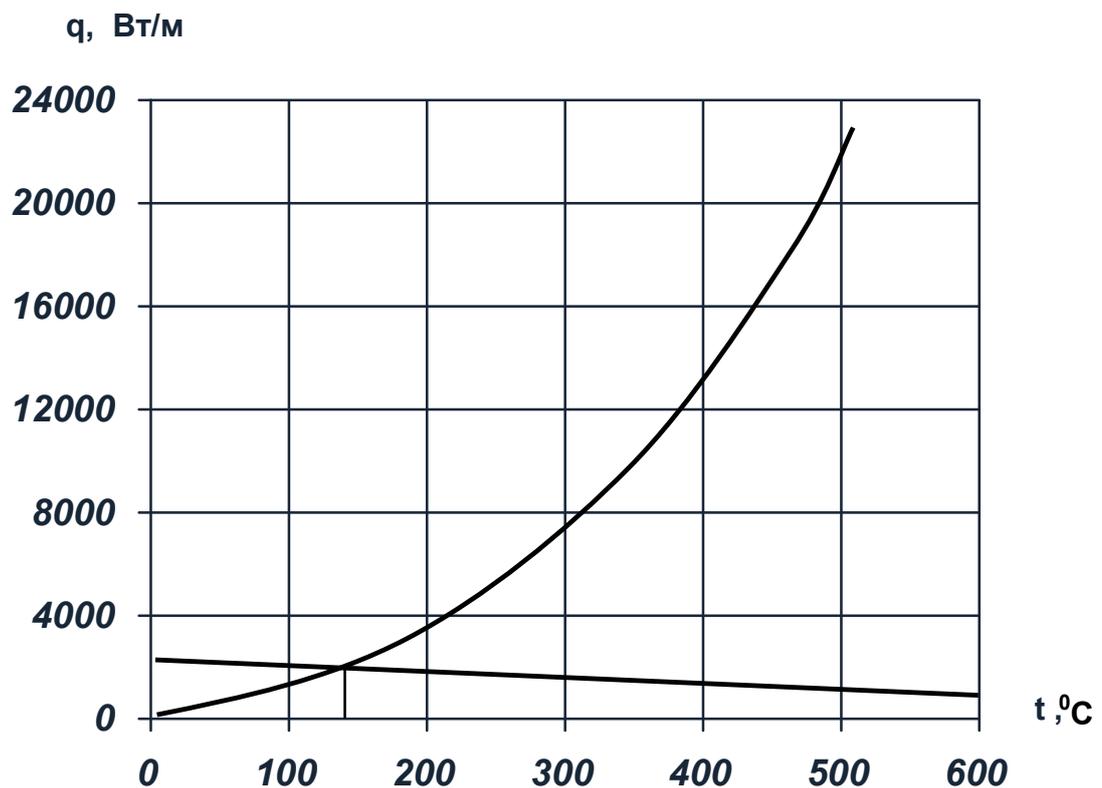


Рис2. Знаходження температури зовнішньої поверхні печі

Розрахунок для стін, склепіння і череня проводиться окремо, а потім сумується:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{ч}} + Q_{\text{скл}}, \text{ кВт} \cdot \text{г} \quad (22)$$

2.2.2.4 Випромінювання крізь відкрите вікно, $Q_{вих.в}$

Розрахунок проводиться по формулі:

$$Q_{вих.в} = 5,7 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] * \Phi * F * \tau, \text{ Вт} * \text{Г} \quad (23)$$

де 5,7 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²*К⁴)

T_1 - внутрішня температура стін печі, К;

T_2 - середня температура в цеху, К;

Φ - коефіцієнт діафрагмування (див.табл.ДЗ);

F - площа випромінювання вікна, м²;

τ - тривалість роботи з відкритим вікном, г.

2.2.2.5 Випромінювання кладки і склепіння за час завантаження печі зверху $Q_{зав}$

Розрахунок провадиться окремо для склепіння і робочого простору.

$$Q_{зав} = 5,7 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] * F * \tau, \text{ Вт} * \text{Г} \quad (24)$$

де T_1 - середня температура склепіння або робочого простору печі, за час завантаження, К;

F - поверхня, що випромінює теплоту, яка рівняється горизонтальній проекції кладки на рівні п'ят склепіння, м²;

τ - тривалість завантаження. При завантаженні шихти зверху баддею робочий простір відкрито 3 хв., склепіння - 5 хв.

2.2.2.6 Втрати теплоти з газами, які відходять Q_g

Крізь здовові створи у вентиляцію або через газовідвід з печі виходять гази, які виносять з собою фізичну і хімічну теплоту. Теплові втрати з газами складають 2-4 % від загальних витрат теплоти.

2.2.2.7 Втрати теплоти з охолоджуючою водою Q_v

За літературними даними втрати теплоти з охолоджуючою водою складають 3-7 % від загальних витрат теплоти.

2.2.2.8 Невраховані втрати $Q_{нев}$.

Приймають 5 % від загальних витрат теплоти.

2.2.2.9 Електричні втрати $Q_{ел}$

Електричні втрати в трансформаторі, дроселі, струмоведучих пристроях складають 8-10 % загальних витрат електроенергії.

Порівнявши підведену і витрачену теплоту визначають витрату електроенергії W , кВт*г. Одержані результати заносять в зведену таблицю балансу, з визначенням питомої ваги усіх статей (%).

2.3 Техніко-економічні показники роботи печі

Тепловий ККД (коефіцієнт корисної дії) печі:

$$\eta_T = \frac{Q_{мет} + Q_{шл} + Q_{енд}}{W + Q_{ое} + Q_{екз}} \cdot 100, \% \quad (25)$$

Електричний ККД :

$$\eta_{ел} = \frac{W - Q_{ел}}{W} \cdot 100, \% \quad (26)$$

Питомі витрати електроенергії :

$$W_{пит} = \frac{W}{G}, \text{ кВт} \cdot \text{г/т} \quad (27)$$

3.ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ

Метод визначення потужності печі, який дозволяє знайти найбільш вигідне економічне рішення, розроблено М.В.Окорочковим [5].

Більш просто, хоча й менш точно, ця задача вирішується, якщо задати тривалість періоду розплавлення. Тоді середня потужність періоду розплавлення P_c визначається по формулі :

$$P_c = \frac{G \cdot q + q_1 + q_2}{\cos\phi \cdot \eta_2 \cdot \tau_1}, \text{кВА} \quad (28)$$

де G – маса садки, т ;

q – теоретична питома втрата енергії на розплавлення металу (для сталі близько 360 кВт · г /т) ;

q_1, q_2 – теплові втрати печі, відповідно під час перерви між плавками і в період розплавлення, кВт · г ;

$\cos\varphi$ – середньозважений коефіцієнт потужності агрегату за період розплавлення, $\cos\varphi = 0,85$;

η_e – електричний К.К.Д. печі за час розплавлення, $\cos\varphi = 0,9$;

τ_1 – тривалість періоду розплавлення, г.

По середені потужності періоду розплавлення визначають номінальну потужність трансформатору.

$$P_{\text{ном}} = K \cdot P_c, \text{ кВт} \quad (29)$$

Для середніх та великих печей рекомендується $K = 1,25$, а для малих печей близько одиниці.

В період включання печі між плавками τ_5 входять випуск металу τ_2 , очистка і заправка печі τ_3 та завалка τ_4 .

$$\tau_5 = \tau_2 + \tau_3 + \tau_4, \text{ хв} \quad (30)$$

Теплові втрати в цей час складаються із втрат крізь кладку, крізь відкрите вікно (під час заправки), випромінюванням кладки і склепіння за час завантаження, з охолоджуючою водою, з газами які відходять, та неврахованих втрат.

$$q_1 = Q_{\text{кл}} \cdot \frac{\tau_5}{\tau} + Q_{\text{вв}} \cdot \frac{\tau_3}{\tau_{\text{відкр}}} + Q_{\text{зав}} + (Q_{\text{в}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{нв}}) \frac{\tau_5}{\tau_4}, \text{ кВт} \cdot \text{г} \quad (31)$$

де $Q_{\text{кл}}$ – теплові втрати крізь кладку;

$Q_{\text{вв}}$ – теплові втрати крізь відкрите вікно;

$Q_{\text{зав}}$ – теплові втрати випромінюванням під час завантаження;

$Q_{\text{в}}$ – теплові втрати з охолоджуючою водою;

$Q_{\text{г}}$ – теплові втрати з газами, які відходять;

$Q_{\text{нв}}$ – невраховані втрати;

$\tau_{\text{відкр}}$ – загальний час роботи печі з відкритим вікном, хв;

τ – загальна тривалість плавки, хв.

Теплові втрати за період розплавлення складаються з втрат через кладку, через відкрите вікно, з водою, з газами та неврахованих втрат. Середня потужність теплових втрат за час τ_1 :

$$q_2 = Q_{\text{кл}} \cdot \frac{\tau_1}{\tau} + Q_{\text{вв}} \cdot \frac{\tau_6}{\tau_{\text{відкр}}} + (Q_{\text{в}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{нв}}) \frac{\tau_1}{\tau}, \text{ кВт} \cdot \text{г} \quad (32)$$

де t_6 – час роботи печі з відкритим вікном в період розплавлення, хв.

Узагальнення багаторічного досвіду експлуатації печей виявило наступні найбільш сприятливі максимальні /для періоду розплавлення/ лінійні напруги: 225-300 В для печей місткістю 0,5-1,2 т, 350-400 В для печей місткістю 25-50 т і до 850 В для печей місткістю від 100 і більше тон.

Для розрахунку лінійної напруги U_2 (максимальна вторинна напруга) можна використати формулу :

$$U_2 = 36 \sqrt[3]{P_{ном}} \text{ , В} \quad (33)$$

Для печей невеликої місткості достаньо мати 4 ступені напруги, для більш великих до 12.

При вибраних значеннях U_2 і заданій потужності пічного трансформатору $P_{ном}$, кВа , визначають струм в електроді печі.

$$J = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{U_2 \cdot \sqrt{3}} \text{ , А} \quad (34)$$

звідси діаметр електроду (табл.Д4)

$$d_{ел} = \sqrt{\frac{4 \cdot J}{\pi \cdot J_d}} \text{ , см} \quad (35)$$

де J_d – густина робочого струму, А/см²

Діаметр розпаду електродів $d_{ре}$ (рис.3) повинен задовольняти дві умови: для рівномірного випромінювання на стіни і рівномірного прогріву ванни відношення $d_{ре}/D_2$ бажано мати меншим і близьким до 0,3 ; для розміщення електродотримачів і охолоджувачів електродів, достатньої міцності центру склепіння необхідно:

$$d_{ре}/d_e = 2,5 - 3,5 \quad (36)$$

Більші значення відносяться до печей меншої місткості, та графітових електродів.

4. ПРИКЛАД РОЗАХУНКУ

Розрахувати дугову сталеплавильну піч з кислотою футерівкою номінальною місткістю 6 т, яка виплавляє звичайну вуглецеву сталь.

4.1 Основні розміри плавильного простору

Об'єм сталі в ванні (1)

$$V = 0,145 \cdot 6 = 0,87 \text{ м}^3$$

Повний об'єм ванни до порогу робочого вікна (2)

$$V = 0,87 + \frac{0,05 \cdot 6}{3,0} + 0,1 \cdot 0,87 = 1,05 \text{ м}^3$$

Повна висота ванни Н до рівня порогу робочого вікна (3):

$$H = 0,38 \cdot 6^{0,25} = 0,595 \text{ м} \sim 0,6 \text{ м},$$

з них висота конічної частини Н1 = 0,48 м і сферичної Н2 = 0,12 м,
ΔН= 0,09 м.

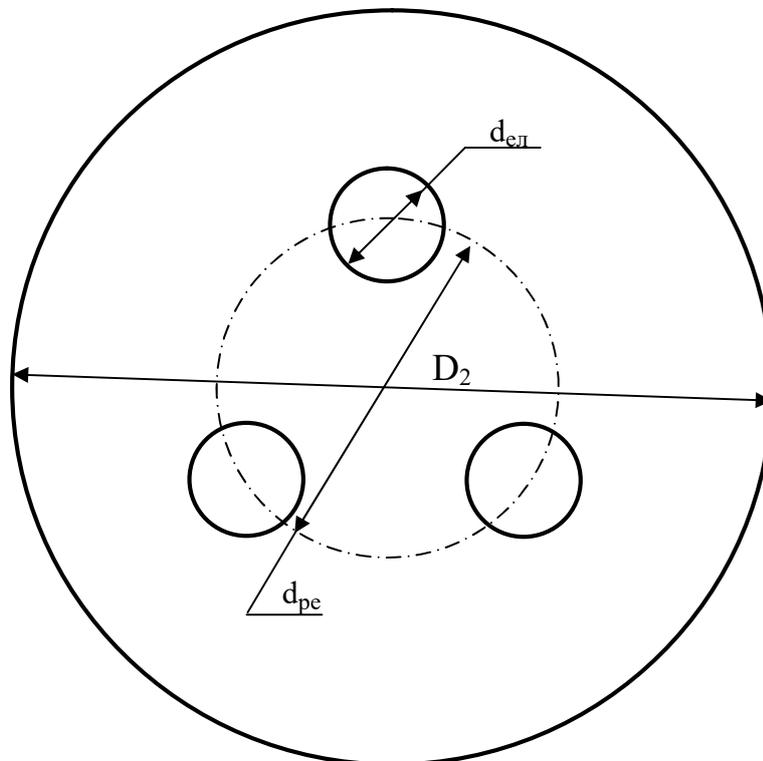


Рис.3. Знаходження діаметру розпаду електродів

Діаметр ванни на рівні порогу робочого вікна (4):

$$d_1 = 0,89 \cdot 0,6 + \sqrt{\frac{1,05}{0,71 \cdot 0,6} - \frac{0,6^2}{4}} = 2,075 \text{ м}$$

Діаметр плавильного простору на рівні відкосів (5):

$$D_1 = 2,075 + 2 * 0,09 = 2,255 \text{ м}$$

Висота плавильного простору (5):

$$K = 0,45 * 2,255 = 1,045 \text{ м}$$

Верхній діаметр плавильного простору (6):

$$D_2 = 2,255 + 2 * 0,08(1,045 - 0,09) = 2,407 \text{ м}$$

Стріла склепіння:

$$K = 0,1 * 2,407 = 0,24 \text{ м}$$

Робоче вікно (7):

$$M = 0,33 * 2,255 = 0,77 \text{ м}$$

$$N = 0,7 * 0,77 = 0,54 \text{ м}$$

$$\Delta N = 0,13 * 0,77 = 0,1 \text{ м}$$

Товщина череня (8):

$$E = 0,4 * \sqrt[3]{6} = 0,5 \text{ м}$$

Виконання череня:

діатомова засипка	- 0,02 м
шамот легковагий 2x65 мм	- 0,13 м
динасова цегла 2x113 мм	- 0,226 м
набивка	- 0,124 м

Всього - 0,5 м

Виконання стін:

азбест	- 0,01 м
шамот легковагий 2x65 мм	- 0,13 м
динасова цегла 65 мм + 230 мм	- 0,295 м

Всього - 0,435 м

Склепіння з динасової цегли - L = 0,23 м

Діаметр кожуха печі Дк (9):

$$D_k = 2,255 + 2 / 0,295 + 0,14 / = 3,125 \text{ м}$$

Зовнішній діаметр кожуха на рівні п'ят склепіння Дк.з. (10):

$$D_{k.z.} = 3,125 + 2 * 0,018 = 3,161 \text{ м}$$

4.2 Тепловий баланс

Допустимо, що для плавки вуглецевої сталі в печі з кислою футерівкою, яка загрузається зверху, слідуючу тривалість операцій, год. – хв.:

очистка та заправка печі	- 0-10
завалка	- 0-05
розплавлення	- 1-20
окисний період	- 0-20
відновний період	- 0-30
випуск	- 0-06
<hr/>	
Всього	

Прихід теплоти

Електроенергія, яка забирається з мережі:

$$Q_{ee} = W, \text{ кВт} * \tau$$

Теплота окислення електродів (11).

Витрата графітованих електродів при кислому процесі дорівнює 4-6 кг/т. Приймаємо для розрахунку 5 кг/т рідкої сталі.

$$Q_{ee} = 0,6 * 33500 * 5 * 6 = 603000 \text{ кДж} = 167,6 \text{ кВт} * \tau$$

Теплота екзотермічних реакцій $Q_{екз}$ для звичайної плавки в печі з кислою футерівкою приймають 2 % від загальної кількості приходу теплоти:

$$Q_{прих} = W + 167,6 + 0,02 (W + 167,6), \text{ кВт} * \tau$$

Витрати теплоти

Тепловий вміст металу $Q_{мет}$ (13):

$$\begin{aligned} Q_{мет} &= 6000 * [0,703/1500 - 10/+272,1 + 0,816/1620 - 1500/] = \\ &= 8504940 * 2,78 * 10^{-4} = 2364,4 \text{ кВт} * \tau \end{aligned}$$

Тепловий вміст шлаку $Q_{шл}$, приймаючи кратність шлаку 0,05:

$$Q_{\text{шл}} = 1,09/1650-10/ + 209,4*6000*0,05 = 599100 \text{ кДж} = \\ = 599100*2,78*10^{-4} = 166,5 \text{ кВт.г}$$

Теплота ендотермічних реакцій $Q_{\text{енд}}$. Головним ендотермічним процесом в дугових печах є окислення вуглецю рудою. На 1 кг вуглецю, який окислився, затрачують 6814,7 кДж теплоти.

При окисленні 0,2 % вуглецю потрібно:

$$6614,7*0,002*6000 = 81776,4 \text{ кДж}$$

На інші ендотермічні реакції при кислому процесі втрати теплоти складають приблизно половину цієї величини. Всього на ендотермічні реакції:

$$Q_{\text{енд}} = 1,5 * 81776,4 = 122664,6 \text{ кДж} = 34,1 \text{ кВт*г}$$

Втрати теплоти крізь кладку $Q_{\text{кл}}$ (14).

Теплопровідність вогнетривких матеріалів розраховують по рівнянням, які наведені в табл. Д1.

Втрата крізь бокові стінки.

Задаємося середніми температурами шарів і визначаємо для них коефіцієнти теплопровідності. Всі дані для розрахунку теплових опорів зводимо в таблицю 3.

Тепловий опір стінки (15):

$$R_m = \sum \frac{s}{\lambda * F_p} = \frac{0,22}{2,19*8,43} + \frac{0,13}{0,318*9,34} + \frac{0,01}{0,179*9,58} = 0,011906 + \\ + 0,043769 + 0,005825 = 0,0615 \text{ к/Вт}$$

$$\text{По (16) } Q_{\text{max}} = \frac{1300-10}{0,0615} = 20975,7 \text{ Вт}$$

Максимальний питомий потік (17):

$$q_{\text{max}} = \frac{20975,7}{9,58} = 2189,5 \text{ Вт/м}^2$$

Таблиця 2. Розміри футерівки печі

Частина футерівки печі	Найменування шару	Товщина шару, S, м	Площа, м ²			Примітка
			внутрішня F _{вн}	зовнішня F _{зов}	Розрахункова F _р	
Стіни	Динас	0,295×0,75- -0,22	7,78	9,13	8,43	$F = \pi(R+r)\sqrt{(R-r)^2 + h^2}$ $F_p = \sqrt{F_{вн} * F_{зов}}$
	шамот легковагий ШЛБ-0,4	0,13	9,18	9,58	9,34	
	азбест	0,01	9,56	-	9,58	
черінь	динас (кладка + набивка)	0,35	4,87	8,89	6,57	$F_k = \pi(R+r)\sqrt{(R-r)^2 + h^2}$ $F = 2\pi r h$ $F_p = \sqrt{F_{вн} * F_{зов}}$
	шамот легковагий ЕШ-1,0	0,13	8,89	10,76	9,78	
	кришка діатомова КД-500	0,02	10,75	-	107	
склепіння	Динас	0,23×0,75- -0,17	5,74	-	5,74	Горизонтальна проекція склепіння

Таблиця 3. Дані для розрахунку теплового опору стінки

Шар стінки	S, м	F _р , м ²	t _{ср} , °С	λ, Вт/(м·К)	
				Розрахункова формула	Одержані значення
динас	0,22	8,43	1200	1,4+0,66 10 ⁻³ ·t _{ср}	2,19
шамот легковагий ШЛБ-0,4	0,13	9,34	600	0,15+0,28 10 ⁻³ ·t _{ср}	0,318
азбест БТ	0,01	9,59	200	0,128+0,255 10 ⁻³ ·t _{ср}	0,179

Відповідно рис. 2, точка перетину дає температуру зовнішньої поверхні 135 °С.

Повний потік крізь стінку становить:

$$Q = \frac{1300 - 135}{0,0615} = 18943,1 \text{ Вт}$$

За плавку при її тривалості 2,5 год. втрати крізь стінку становлять:

$$Q_{cm} = 18943,1 * 2,5 = 47357 \text{ Вт} * \Gamma = 47,36 \text{ кВт} * \Gamma$$

Перевіряємо правильність прийнятих значень теплопровідності (18):

$$\Delta t_1 = 18943,1 * 0,011906 = 225$$

$$\Delta t_2 = 18943,1 * 0,043769 = 829$$

$$\Delta t_3 = 18943,1 * 0,005825 = 110$$

Звідси визначаємо середини температури шарів футерівки (19):
Розходження з попередньо прийнятими значеннями становить:

$$\Delta \lambda_1 = \frac{2,19 - 2,18}{2,19} * 100 = 0,46\%$$

$$\Delta \lambda_2 = \frac{0,335 - 0,318}{0,335} * 100 = 5,1\%$$

$$\Delta \lambda_3 = \frac{0,179 - 0,176}{0,179} * 100 = 1,67\%$$

Так, як розходження менше 10%, перерахунку теплового потоку не проводимо.

Таблиця 4. Уточнені значення теплопровідності

Найменування шару	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Температура пару, $^\circ\text{C}$			Теплопровідність	
		максимальна	мінімальна	середня	уточнене значення	попередньо прийняте значення
Динас	225	1300	1075	1187,5	2,18	2,19
Легковагий шамот	329	1075	246	660,5	0,335	0,318
Азбест		246	135	190,5	0,176	0,179

Втрати крізь черинь

Задаємось середніми температурами (табл.5).

Таблиця 5. Дані для розрахунку теплового опору череня

Шар стінки	S, м	F _p , м ²	t _{ср} , °C	λ, Вт/(м·К)	
				Розрахункова формула	Одержані значення
динас	0,35	6,57	1050	1,4+0,66 10 ⁻³ ·t _{ср}	2,09
шамот легковагий ШЛБ-0,4	0,13	9,78	600	0,35+0,35 10 ⁻³ ·t _{ср}	0,59
діатоміт КД-500	0,02	10,76	250	0,105+0,232 10 ⁻³ ·t _{ср}	0,16

Тепловий опір череня:

$$R_m = \sum \frac{s}{\lambda * F_p} = \frac{0,35}{2,09 * 6,57} + \frac{0,13}{0,56 * 9,78} + \frac{0,02}{0,16 * 10,76} = 0,025451 + 0,023736 + 0,011617 = 0,060804, \text{ К/Вт.}$$

$$Q_{max} = \frac{1300 - 10}{0,060804} = 21215,7 \text{ Вт}$$

$$q_{max} = \frac{Q_{max}}{F_{зог}} = \frac{21215,7}{10,76} = 1971,7 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідно рис.2, точка перетину дає температуру зовнішньої поверхні 125 °C.

$$Q = \frac{1300 - 125}{0,060804} = 19324,4 \text{ Вт}$$

За плавку втрати крізь черінь становлять:

$$Q_{\text{ч}} = 19324,4 * 2,5 = 48311 \text{ Вт} * \Gamma = 48,31 \text{ кВт} * \Gamma$$

Перевіряємо правильність прийнятих значень теплопровідності:

$$\Delta t_1 = 19324,4 * 0,025451 = 492$$

$$\Delta t_2 = 19324,4 * 0,023736 = 459$$

$$\Delta t_3 = 19324,4 * 0,011617 = 224,5$$

Таблиця 6. Уточнені значення теплопровідності

Найменування шару	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Температура шару, $^\circ\text{C}$			$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	
		максимальна	мінімальна	середня	уточнене значення	попередньо прийняте значення
Динас	492	1300	808	1054	2,09	2,09
Легковагий шамот	459	808	349	579	0,55	0,56
Діатоміт	224,5	349	125	237	0,16	0,16

Розходження з попередньо прийнятими значеннями незначні, тому перерахунку робити не потрібно.

Втрати крізь склепіння

Приймаємо $t_{\text{cp}} = 800 ^\circ\text{C}$, тоді $\lambda = 1,4 + 0,66 \cdot 800 \cdot 10^{-3} = 1,93$

$$R_m = \frac{0,17}{1,93 \cdot 5,74} = 0,015345$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{1300 - 10}{0,015345} = 84064 \text{ Вт}$$

$$q_{\text{max}} = \frac{84064}{5,74} = 14645,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

Звідси, відповідно рис. 2, точка перетину дає температуру $360 ^\circ\text{C}$.

$$Q = \frac{1300 - 360}{0,015345} = 61257,7 \text{ Вт}$$

Втрати крізь склепіння за плавку становлять:

$$Q_{\text{скл}} = 61257,7 \cdot 2,5 = 153144 \text{ Вт} \cdot \text{Г} = 153,14 \text{ кВт} \cdot \text{Г}$$

Загальна потужність теплових втрат крізь кладку становить:

$$Q_{\text{кл}} = 47,36 \cdot 48,31 + 153,14 = 248,81 \text{ кВт} \cdot \text{Г}$$

Випромінювання крізь відкрите вікно /23/:

Площа вікна $F = 0,77 \times 0,44 = 0,34 \text{ м}^2$; при товщині стінки 0,36 м, коефіцієнт діафрагмування Φ , дорівнює 0,61.

Для розрахунків приймаємо наступні данні (табл.7):

Таблиця 7. Час та середня температура футерівки по періодам плавки

Період плавки	τ , хв.	t , °С
Заправка	10	1200
Плавлення	15	1300
Окисний період	15	1520
Відновний період	15	1058

Тоді втрати крізь відкрите вікно становлять:

$$Q_{\text{вып.в}} = 0,57 * 0,36 * 0,61 \left\{ \frac{10}{60} \left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] + \left[\left(\frac{1573}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] + \right. \\ \left. + \frac{15}{60} \left[\left(\frac{1793}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] + \frac{15}{60} \left[\left(\frac{1853}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \right\} = 9806,9 + 19135,4 + \\ + 32319,1 + 36870,4 = 98131,8 \text{ Вт*Г} = 98,13 \text{ кВт*Г}$$

Опромінювання кладки і склепіння за час заправки шихти (24).

Середня температура стін за час заправки 100 °С; середня температура склепіння 950 °С.

$$Q_{\text{зав.кл}} = 5,7 \left[\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] * 5,74 * 3/60 = 42,84 \text{ кВт*Г}$$

$$Q_{\text{зав.скл}} = 5,7 \left[\left(\frac{1223}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] * 5,74 * 5/60 = 60,8 \text{ кВт*Г}$$

$$Q_{\text{зав}} = 42,84 + 60,8 = 103,64 \text{ кВт*Г}$$

Втрати теплоти з газами, які відходять Q_2 приймаємо 3 %.
 Втрати теплоти з охолоджуючою водою приймаємо 5 %. Невраховані втрати становлять 5 %. Електричні втрати становлять 10% загальних витрат теплоти.

Таким чином статті витрати теплоти

$$Q_{мет} + Q_{ша} + Q_{енд} + Q_{кл} + Q_{вин.в} + Q_{зав} = 2364,4 + 166,5 + 34,1 + 248,81 + 98,13 + 103,64 = 3015,58 \text{ кВт*Г}$$

$$\begin{aligned} \text{Тоді} \quad Q_2 &= \frac{3015,58 * 3}{77} = 117,5 \text{ кВт*Г} \\ Q_6 &= \frac{3015,58 * 5}{77} = 195,82 \text{ кВт*Г} \\ Q_{н.в} &= 195,82 \text{ кВт*Г} \\ Q_{ел} &= \frac{3015,58 * 10}{77} = 391,63 \text{ кВт*Г} \end{aligned}$$

Всього витрати теплоти в печі становлять 3916,35 кВт*Г.

Прирівнявши витрачену і підведену теплоту визначаємо витрату електроенергії:

$$W + 167,6 + 0,02 / W + 167,6 / = 3916,35$$

$$W = 3672 \text{ кВт.Г}$$

Техніко-економічні показники роботи печі:

Тепловий К.К.Д. печі (25):

$$\eta_T = \frac{2364,4 + 166,5 + 34,1}{3672 + 167,6 + 73,44} * 100 = 65,6\%$$

Електричний К.К.Д. (26):

$$\eta_{ел} = \frac{3916,35 - 391,63}{3916,35} * 100 = 90\%$$

Питомі витрати електроенергії (27):

$$W_{пит} = \frac{3672}{6} = 612 \text{ кВт*Г/Т}$$

Таблиця 8. Тепловий баланс печі

Найменування статті	Означення	Витрати теплоти	
		кВт*г	%
Прихід теплоти			
Електроенергія з мережі	$Q_{ел}$	3672,00	93,76
Окислення електродів	$Q_{ос}$	167,60	4,28
Екзотермічні реакції	$Q_{екз}$	76,79	1,96
Всього прихід	$Q_{прих}$	3916,39	100
Витрати теплоти			
Тепловий вміст металу	$Q_{мет}$	2364,40	60,37
Тепловий вміст шлаку	$Q_{шл}$	166,50	4,25
Ендотермічні реакції	$Q_{енд}$	34,10	0,87
Втрати крізь кладку	$Q_{кл}$	248,81	6,35
Випромінюванні крізь відкриті вікна	$Q_{вв}$	98,13	2,50
Випромінювання кладки під час загрузли шихти	$Q_{зш}$	103,64	2,66
Втрати а газами	$Q_{г}$	117,50	3,00
Втрати з охолоджуючою водою	$Q_{ов}$	195,82	5,00
Електричні втрати	$Q_{ев}$	391,63	10,00
Невраховані втрати	$Q_{нв}$	195,82	5,00
Непогодженість балансу	$\pm \Delta Q$	0,04	-
Всього витрати;	$Q_{витр}$	3916,39	100

4.3 Електричний розрахунок печі

В період вимкнення печі між плавками входять випуск металу 5 хв, очистка та заправка печі 10 хв і завалка 5хв.

$$\tau_5 = 5 + 10 + 5 = 20 \text{ хв}$$

Враховуючи дані теплових розрахунків визначаємо (31):

$$q_1 = 248,81 * \frac{20}{150} + 98,13 * \frac{10}{50} + 103,64 + (197,71 + 118,62 + 197,71) * \frac{20}{150}$$

$$= 33,17 + 17,84 + 103,64 + 68,54 = 223,19 \text{ кВт*г}$$

$$\text{по(32)} \quad q_2 = 248,81 * \frac{80}{150} + 98,13 * \frac{15}{55} + (197,71 + 118,62 + 197,71) * \frac{80}{150}$$

$$= 132,7 + 26,76 + 274,15 = 433,61 \text{ кВт*г}$$

Середня потужність періоду розплавлення (28):

$$P_c = \frac{6 \cdot 360 + 223,19 + 433,61}{0,85 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 2832,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Приймаємо трансформатор з номінальною потужністю 3000 кВ*А

Максимальна лінійна нагрузка (див.період розплавлення) (33) :

$$U_2 = 36 \sqrt[3]{3000} = 266 \sim 270 \text{ В}$$

Для печі даної місткості приймаємо 4 ступені навантаження. Другу ступінь приймаємо 85 % від верхньої, останні дві будуть одержані перемиканням первинних обмоток трансформатору в трикутника на зірку:

I ступінь 270 В

II ступінь $0,87 \cdot 270 = 230 \text{ В}$

III ступінь $\frac{270}{\sqrt{3}} = 156 \text{ В}$

IV ступінь $\frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ В}$

Струм в електроді (34):

$$J = \frac{3000 \cdot 10^3}{270 \cdot \sqrt{3}} = 6415 \text{ А}$$

Враховуючи дані табл. Д4, діаметр графітованого електроду (35):

$$d_{\text{ел}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6415}{3,14 \cdot 23}} = 18,8 \text{ см}$$

Приймаємо графітований електрод діаметром 200 мм або вуглецевий електрод діаметром

$$d_{\text{ел}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6415}{3,14 \cdot 10}} = 28,6 \text{ см}$$

вуглецевий електрод діаметром 300 мм.

Приймаємо $d_{\text{пе}} = 750 \text{ мм}$, тоді по (35):

$$\frac{d_{\text{пе}}}{D_2} = \frac{750}{2407} = 0,31; \quad \frac{d_{\text{пе}}}{d_e} = \frac{750}{300} = 2,5, \quad \text{що задовольняє заданим}$$

умовам.

Таблиця Д1 Основні властивості деяких вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів

Найменування матеріалу	Густина, кг/м ³	Теплопровідність λ , Вт/(м*К)	Температура використання, °С (не більш)
Шамот загального призначення марки ШБ	1900	$0,9+0,3*10^{-3}*t_{cp}$	1350
Шамот легковагий марки ШЛБ-І,О	1000	$0,35+0,28*10^{-3}*t_{cp}$	1300
Шамот легковагий марки ШДБ-0,4	400	$0,15+0,66*10^{-3}*t_{cp}$	1150
Динас для електроплавиль- них печей	1900	$1,4+0,66*10^{-3}*t_{cp}$	1660
Динас легковагий марки ДЛ-І,2	1200	$0,41+0,79*10^{-3}*t_{cp}$	1550
Магнезит звичайний марки М-9І	2700	$3,8-7,6*10^{-3}*t_{cp}$	1700
Хромоганезит	2870	$2,65-0,76*10^{-3}*t_{cp}$	1600
Магнезито-хроміт марок МХСО; ПШСО	2800	$3,88-1,48*10^{-3}*t_{cp}$	1600
Діатомітові вироби марки 500	500	$0,105+0,232*10^{-3}*t_{cp}$	900
Перлітові вироби на цементній зв'язці ПЦ-350	350	$0,081+0,186*10^{-3}*t_{cp}$	600
Азбестовий папір БТ	1250	$0,128+0,255*10^{-3}*t_{cp}$	450
Вата мінеральна ВМ-125	125	$0,053+0,186*10^{-3}*t_{cp}$	600
Вермикуліт спучений В-150	150	$0,07+0,232*10^{-3}*t_{cp}$	1100
Кришка діамітова КД-500	500	$0,105+0,232*10^{-3}*t_{cp}$	900

Таблиця Д2. Питомий тепловий потік в навколишнє середовище з температурою 20 °С

Температура поверхні, °С	Питомий тепловий потік, q , Вт/м ²	Температура поверхні, °С	Питомий тепловий потік, q , Вт/м ²
25	44	40	2020
30	96	160	2520
40	211	180	3080
50	340	200	3680
60	482	250	5420
70	638	300	7400
80	800	350	10200
90	980	400	13500
100	1170	450	17300
120	1580	500	22000

Таблиця Д3. Значення коефіцієнтів діафрагмування Φ для розрахунку теплових втрат випромінюванням крізь вікна

Товщина стінки печі, мм	Ширина вікнами	Висота вікна, N, мм				
		150	250	450	600	750
115	150	0,55	0,63	0,66	0,66	0,69
	300	0,63	0,70	0,73	0,76	0,78
	600	0,68	0,76	0,80	0,82	0,84
	900	0,71	0,74	0,83	0,85	0,87
	1200	0,72	0,81	0,84	0,87	0,89
	1500	0,73	0,82	0,86	3,89	0,91
230	150	0,43	0,49	0,52	0,55	0,56
	300	0,49	0,56	0,60	0,63	0,64
	600	0,55	0,63	0,67	0,70	0,72
	900	0,57	0,66	0,70	0,73	0,75
	1200	0,59	0,68	0,72	0,76	0,78
	1500	0,61	0,69	0,74	0,77	0,79
345	150	0,36	0,43	0,45	0,47	0,49
	300	0,42	0,46	0,52	0,55	0,57
	600	0,47	0,55	0,59	0,62	0,64
	900	0,50	0,58	0,63	0,66	0,70
	1200	0,52	0,60	0,65	0,68	0,71
	1300	0,53	0,61	0,66	0,70	0,72
460	150	0,31	0,36	0,39	0,42	0,43
	300	0,36	0,43	0,46	0,49	0,51
	600	0,42	0,49	0,53	0,56	0,58
	900	0,45	0,53	0,57	0,60	0,04
	1200	0,47	0,58	0,59	0,63	0,65
	1500	0,46	0,61	0,61	0,64	0,67

Таблиця Д4. Основні параметри електродів дугових печей

Діаметр електроду, мм	Параметри			
	Густина робочого струму, А/см ²		максимальний струм, А	
	вуглецеві	графітовані	вуглецеві	графітовані
150	12	26	2120	4400
175	-	24	-	5500
200	II	23	3460	6900
225	-	22	-	8350
250	10	21	4900	1 0000
300	10	19	7060	12700
350	10	18	9600	16400
400	9	16	11300	20100
450	-	16	-	24400
500	9	15	17700	28500

Таблиця Д5. Деякі характеристики дугових сталеплавильних печей

Параметри	ДСП-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-12	ДСП-25	ДСП-50
Номінальна місткість, т	0,5	1,5	3,0	6,0	12,0	25,0	50,0
Тривалість плавки, г: основний процес кислий процес	1,7 1,4	1,9 1,5	2,4 1,0	2,8 2,0	3,3 2,3	4,0 2,7	4,0 2,5
Потужність трансформатора, кВ*А	630	1250	2000	4000	8000	15000	32000
Напруга первинної обмотки трансформатора, кВ	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10 35	
Вторинна напруга, В	216-98	225-103	243-116	281-118	318-120	370-128	407-144
Струм вторинної обмотки трансформатора, кА.	1,085	2,57	2,25	6,3	10,4	24,1	35,0
Діаметр графітованих електродів, мм	150	200	200	300	350	400	500
Діаметр розпаду електродів, мм	500	600	750	1000	1000	1150	1450
Діаметр каркасу на рівні відкосів, Дк, ми	1660	2130	2900	3350	3785	4700	5800
Діаметр ванни на рівні відкосів, Д ₁ , мм	1050	1500	1800	2230	2740	3540	4580
Висота ванни до рівня порогу робочого вікна, Н, мм	230	360	400	425	555	775	890
Питома витрата електроенергії, кВт*.г/т	650	550	525	510	500	470	450
Питома витрата електроенергії на розплавлення твердої шихти, кВт.г/т	558	479	465	480	435	430	415
Маса металоконструкції печі, т	8,9	21,5	26,5	50,0	68,0	145,0	285,0

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов /А.Д.Свенчанский, И.Т.Жердев, А.М.Кручинин и др.: Под ред. А.Д.Свенчанского. - 2-е изд., переработанное и дополненное. - М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с.
2. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчёты электрических печей: Учебник для техникумов. - М.: "Энергия", 1977. - 304 с.
3. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчётов и проектирования: 2-е издание, дополненное и переработанное. - М.: "Металлургия", 1975, - 366 с.
4. Электротермическое оборудование: Справочник //Под общ. ред. А.П.Альтгазена. - 2-е изд., переработанное и дополненное - М. "Энергия", 1980. - 416 с.
5. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи.М.:"Металлургия", 1971. - 334 с.
6. Болотов А.В., Шепель Г.А, Электротехнические установки: Учебник для вузов. - М.: "Высшая школа", 1988. - 336 с.
7. Долотов Г.П. Кондаков Е.А. Печи и сушила литейного производства: Учебник для металлургических техникумов. - 3-е изд. переработанное и дополненное -М.: Машиностроение, 1990. - 304 с.