

Практичне заняття № 6

РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО ВУЗЛА ПЕЧІ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ

Тепловий вузол включає підставку для тигля, нагрівач і систему екранів. Конструкція теплового вузла багато в чому визначає особливості кристалізації, структуру вирощуваного монокристала, розподіл в нім домішок. Тепловий вузол як технологічна система містить взаємозв'язані елементи. Змінюючи конструкцію декількох елементів, можна отримувати практично однакові умови вирощування монокристалів. Конструктивні основні елементи теплового вузла чинять вплив на особливості вирощування монокристалів кремнію.

У установках з резистивним нагрівом використовують два основні типи нагрівачів різної модифікації: з бічним і донно-бічним нагрівом. Форма ізотерм і потоків тепла в розплаві залежить від конструктивних особливостей нагрівача. Нагрівачі з донно-бічним нагрівом, як правило, застосовуються при завантаженні в тигель до 4-6 кг; при великих завантаженнях використовуються нагрівачі з бічним нагрівом. Постійний або змінний електричний струм до нагрівача подають по водоохолоджуваних струмовідводах, що проходять через піддон камери. Використання трифазного змінного струму для живлення нагрівача призводить до сильного додаткового перемішування розплаву, при якому різко збільшується концентрація кисню і зростає неоднорідність розподілу питомого електричного опору в поперечних перерізах монокристала. Тому найбільшого поширення набули джерела постійного струму.

На підставі викладеного для вирощування монокристалів методом Чохральського вибрано тепловий вузол закритого типу з резистивним нагрівом, що живиться постійним струмом. Тип нагрівача – з бічним нагрівом. Для екранування застосовується вуглеграфітова тканина, якій ізолюється бічна і донна частині нагрівача. Верхня частина теплового вузла ізолюється графітовими екранами.

Тепловий розрахунок виконують для початкового періоду процесу (нагрівання і плавлення шихти), оскільки ведення саме цього процесу вимагає максимальної витрати електричної енергії. При теп-

ловому розрахунку враховувалися наступні чинники:

- втрати тепла з бічної поверхні нагрівача;
- втрати тепла з нижнього торця нагрівача;
- втрати тепла через графітовий екран з верхньої частини нагрівача;
- втрати тепла з поверхні розплавленого кремнію;
- втрати тепла через підставку для тигля;
- втрати тепла по струмопідводящих шинах нагрівача;
- втрати тепла, що йде на нагрів аргону;
- витрати тепла на нагрів і плавлення шихти;
- витрати тепла на нагрів графітового екранування.

Приклад 1. Розрахувати тепловий вузол печі для вирощування монокристалів силіцію методом Чохральського. Для розрахунку прийmemo:

- діаметр вирощуваного монокристала – 100 мм;
- діаметр кварцового тигля – 330 мм;
- маса завантаження шихти в тигель – 30 кг;
- максимальна температура на нагрівачі – 1750 °С;
- температура холодної стінки камери печі – 40 °С;
- склад шихти – кремній напівпровідникової чистоти;
- робоче середовище – аргон з абсолютним тиском в робочій камері 5...20 мм рт. ст.;
- нагрівач – резистивний з графіту марки МГ-1 (ТУ 48-20-90-82);
- теплозахисне екранування виконується з вуглеграфітової тканини ТМП-4.

Розв'язання

1. Тепловтрати з бічної поверхні нагрівача через систему екранів з вуглеграфітової тканини:

$$Q_1 = \frac{\left(\frac{T_{\text{нагр}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{кор}}}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_{\text{н.-экр}}} + \frac{(n-1)}{C_{\text{эер.-экр}} \cdot F_{\text{эер.экр}}} + \frac{1}{C_{\text{экр.корп}} \cdot F_{\text{кар.экр}}}}, \quad (1)$$

де $T_{\text{нагр}}$ – температура нагрівача ($T_{\text{нагр}} = 1750 + 273 = 2023 \text{ K}$);

$T_{\text{кор.}}$ – температура стінки водоохолоджуваного корпусу, ($T_{\text{кор.}} = 40 + 273 = 313 \text{ K}$);

n – кількість шарів тканини ТМП-4 в екрані ($n=15$; за результатами експериментів для забезпечення міцності екрану).

$C_{\text{н.екр.}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання системи нагрівач-екран:

$$C_{\text{н.екр.}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{нагр.}}} + \frac{F_{\text{нар.нагр.}}}{F_{\text{вн.экр.}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{экр.}}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

де C_s – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, ($C_s = 4,9 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год.} \cdot \text{K}$ [6]);

$\varepsilon_{\text{нагр.}}$ – міра чорноти графітового нагрівача, ($\varepsilon_{\text{нагр.}} = 0,9$ [2]);

$\varepsilon_{\text{экр.}}$ – міра чорноти вуглеграфітової тканини, ($\varepsilon_{\text{нагр.}} = 0,87$ [2]);

$F_{\text{нар.нагр.}}$ – площа зовнішньої бічної поверхні нагрівача:

$$F_{\text{нар.нагр.}} = \pi \cdot D_{\text{н.нагр.}} \cdot l = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 0,36 = 0,452 \text{ м}^2,$$

де $D_{\text{н.нагр.}}$ – зовнішній діаметр нагрівача, ($D_{\text{н.нагр.}} = 0,4 \text{ м}$);

l – висота частини нагрівача, що гріє, ($l = 0,36 \text{ м}$).

$F_{\text{вн.экр.}}$ – площа внутрішньої поверхні бічного екрану:

$$F_{\text{вн.экр.}} = \pi \cdot D_{\text{вн.экр.}} \cdot l_{\text{экр.}} = 3,14 \cdot 0,45 \cdot 0,54 = 0,763 \text{ м}^2;$$

де $D_{\text{вн.экр.}}$ – внутрішній діаметр екрану, ($D_{\text{вн.экр.}} = 0,45 \text{ м}$);

$l_{\text{экр.}}$ – висота екрану, ($l_{\text{экр.}} = 0,54 \text{ м}$).

$$C_{\text{н.екр.}} = 4,9 \cdot \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{0,452}{0,763} \cdot \left(\frac{1}{0,87} - 1 \right)} = 4,08 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год.} \cdot \text{C}}.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання системи екран-екран дорівнює:

$$C_{\text{экр.экр.}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{экр.}}} + \frac{F_{\text{вн.экр.}}}{F_{\text{нар.экр.}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{экр.}}} - 1 \right)}, \quad (3)$$

де $F_{\text{нар.екр}}$ – площа зовнішньої поверхні екрану:

$$F_{\text{нар.екр}} = \pi \cdot D_{\text{нар.екр}} \cdot l = 3,14 \cdot 0,49 \cdot 0,54 = 0,83 \text{ м}^2,$$

$D_{\text{нар.екр}}$ – зовнішній діаметр бічного екрану ($D_{\text{нар.екр}} = 0,49 \text{ м}$).

$$C_{\text{екр.екр}} = 4,9 \cdot \frac{1}{\frac{1}{0,87} + \frac{0,763}{0,83} \cdot \left(\frac{1}{0,87} - 1 \right)} = 3,81 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання системи екран-корпус печі дорівнює:

$$C_{\text{екр.кор}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{екр.}}} + \frac{F_{\text{нар.екр.}}}{F_{\text{корп.}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{корп.}}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

де $F_{\text{корп}}$ – площа корпусу печі:

$$F_{\text{корп}} = \pi \cdot D_{\text{корп}} \cdot l_{\text{корп}} = 3,14 \cdot 0,6 \cdot 0,74 = 1,39 \text{ м}^2,$$

$D_{\text{корп}}$ – діаметр корпусу печі ($D_{\text{корп}} = 0,6 \text{ м}$);

$l_{\text{корп}}$ – висота корпусу печі ($l_{\text{корп}} = 0,74 \text{ м}$);

$\varepsilon_{\text{корп}}$ – міра чорноти сталеві стінки печі ($\varepsilon_{\text{екр}} = 0,8 [8]$).

$$C_{\text{екр.кор}} = 4,9 \cdot \frac{1}{\frac{1}{0,87} + \frac{0,83}{1,39} \cdot \left(\frac{1}{0,8} - 1 \right)} = 3,77 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Середня площа екранів:

$$F_{\text{ср.екр.}} = \frac{F_{\text{вн.екр.}} + F_{\text{нар.екр.}}}{2} = \frac{0,763 + 0,83}{2} = 0,796 \text{ м}^2, \quad (5)$$

$$Q_1 = \frac{\left(\frac{2023}{100}\right)^4 - \left(\frac{313}{100}\right)^4}{\frac{1}{4,08} + \frac{(15-1)}{3,81 \cdot 0,796} + \frac{1}{3,77 \cdot 0,83}} = \frac{167404,1}{5,175} = 32348 \text{ ккал/год.}$$

2. Тепловтрати з нижнього торця нагрівача.

Для запобігання контакту рідкого кремнію з металевим піддоном печі, у разі аварійної течії кварцового тигля, вимагається мінімально можлива кількість шарів тканини ТМП-4. Практично було встановлено, що оптимальними є 20 шарів тканини.

$$Q_2 = \frac{C_{\text{пр}} \cdot F_{\text{T}} \left[\left(\frac{T_{\text{н.т.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{n+1}, \quad (6)$$

де $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання нагрівача:

$$C_{\text{пр}} = C_s \cdot \varepsilon_n = 4,9 \cdot 0,9 = 4,4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C};$$

F_{T} – площа поверхні торцевих екранів.

$$F_{\text{T}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{в.бок.}}^2 - d_{\text{ш}}^2) = \frac{3,14}{4} (0,45^2 - 0,07^2) = 0,155 \text{ м}^2 \quad (7)$$

де $D_{\text{в.бок.}}$ – внутрішній діаметр бічного екрану, ($D_{\text{в.бок.}} = 0,45 \text{ м}$);
 $d_{\text{ш}}$ – діаметр отвору для виведення штока тигля, ($d_{\text{ш}} = 0,07 \text{ м}$);
 n – кількість шарів теплозахисної тканини ТМП-4, ($n = 20$);
 $T_{\text{н.т.}}$ – середня температура нижнього торця нагрівача і денця графітового тигля, випромінюючих на екрани піддону:

$$T_{\text{н.т.}} = ((1600 + 1500) / 2) + 273 = 1823 \text{ К};$$

$T_{\text{окр}}$ – середня температура довкілля, $T_{\text{окр}} = 100 + 273 = 373 \text{ К}$.

$$Q_2 = \frac{4,4 \cdot 0,155 \left[\left(\frac{1823}{100} \right)^4 - \left(\frac{373}{100} \right)^4 \right]}{20+1} = \frac{75191}{100} = 3580 \text{ ккал/год.}$$

3. Тепловтрати випромінюванням через графітовий екран з верхньої частини теплового вузла:

$$Q_3 = \frac{C_{\text{пр}} \cdot F_{\text{тор}} \cdot f \left[\left(\frac{T_{\text{н.э.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{n + 1}, \quad (8)$$

де $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання нагрівача,

$$C_{\text{пр}} = 4,9 \cdot 0,9 = 4,4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C};$$

$F_{\text{тор}}$ – площа випромінювання поверхні торцевого екрану.

$$F_{\text{тор}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{н.э.}}^2 - d_{\text{в.н.}}^2) = \frac{3,14}{4} (0,49^2 - 0,37^2) = 0,08 \text{ м}^2, \quad (9)$$

де $D_{\text{н.э.}}$ – зовнішній діаметр верхнього кільцевого екрану,

$$(D_{\text{н.э.}} = 0,49 \text{ м});$$

$d_{\text{в.н.}}$ – внутрішній діаметр кільцевого екрану, ($d_{\text{в.н.}} = 0,37 \text{ м}$);

f – кутовий коефіцієнт опромінення екрану бічними стінками нагрівача, ($f = 0,5$ [5]);

$T_{\text{н.э.}}$ – середня температура в проміжку між нагрівачем і екраном, $T_{\text{н.э.}} = 1600 + 273 = 1873 \text{ К}$;

n – кількість екранів ($n = 2$).

$$Q_3 = \frac{4,4 \cdot 0,08 \cdot 0,5 \cdot \left[\left(\frac{1873}{100} \right)^4 - \left(\frac{373}{100} \right)^4 \right]}{2 + 1} = 7208 \text{ ккал/год.}$$

4. Тепловтрати з поверхні розплавленого силіцію:

$$Q_4 = C_{\text{пр.}} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{р}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

де $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання розплаву силіцію:

$$C_{\text{пр}} = C_s \cdot \varepsilon_p = 4,9 \cdot 0,46 = 2,25 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C};$$

де ε_p – міра чорноти розплаву силіцію, ($\varepsilon_p = 0,46$ [3]);
 F – площа поверхні розплаву, (при D тигля 330 мм, $F=0,085$ м²);
 T_p – температура розплаву, ($T_p = 1723$ К);
 $T_{окр}$ – температура стінки камери, ($T_{окр}=313$ К).

$$Q_4 = 2,25 \cdot 0,085 \cdot \left[\left(\frac{1723}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right] = 16815 \text{ ккал/год.}$$

5. Втрати тепла на графітовій трубі, що служить підставкою для тигля:

$$Q_5 = \lambda \cdot F_T \cdot (t_1 - t_2) \cdot m \cdot l, \quad (11)$$

де λ – теплопровідність графіту [2] ($\lambda = 100$ ккал/м·год·°С).

$$F_T = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4} = \frac{3,14(0,06^2 - 0,03^2)}{4} = 0,002 \text{ м}^2, \quad (12)$$

де d_1 – зовнішній діаметр труби ($d_1 = 0,06$ м);
 d_2 – внутрішній діаметр труби ($d_2 = 0,03$ м);
 m – теплова характеристика труби [5].

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot u}{\lambda \cdot F_T}} = \sqrt{\frac{80 \cdot 0,19}{100 \cdot 0,002}} = 8,7, \quad (13)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі з поверхні труби, що має середню температуру 770 °С, $[(1500 + 40) / 2 = 770]$, у навколишній простір, що має середню температуру 300 °С;

u – зовнішній периметр труби ($u=0,19$ м);

l – відстань від тигля до охолоджуваного кінця труби, ($l = 0,4$ м).

$$Q_5 = 100 \cdot 0,002 \cdot (1500 - 40) \cdot 8,7 \cdot 0,4 = 1016 \text{ ккал/год.}$$

6. Втрати тепла по струмопроводящих «лапах» нагрівача.

Кількість «лап», виходячи з конструкції, приймаємо - 2. Відведення тепла на водоохолоджуваний контакт дорівнює потоку тепла теплопровідністю вивідної частини і половині теплових втрат.

$$Q_6 = 2 \cdot \frac{\lambda \cdot F}{l} (t_h - t_k) + 0,86 \cdot 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot \frac{I^2}{2}, \quad (14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності графіту марки МГ-1, ($\lambda=100$ ккал/м²·год·°С [2]);

F – площа перерізу «лапи», що підводить струм, ($F = 0,11 \cdot 0,025 = 0,00275$ м²);

l – відстань від нагрівача до контакту, ($l = 0,12$ м);

t_h – температура нагрівача в місці контакту з «лапою», ($t_h = 1500$ °С);

t_k – температура водоохолоджуваного контакту, ($t_k = 40$ °С);

ρ – питомий електричний опір графіту марки МГ-1, ($\rho = 10$ Ом·мм²/м [1]);

S – площа перерізу лапи, ($S = 2750$ мм²);

I – сила струму, приймаємо за характеристикою блоку електричного живлення ($I = 2000$ А).

$$Q_6 = 2 \cdot \frac{100 \cdot 0,00275}{0,12} (1500 - 40) + 0,86 \cdot 2 \cdot \frac{10 \cdot 0,12}{2750} \cdot \frac{2000^2}{2} = 8192 \text{ ккал/год.}$$

7. Тепло, що йде на нагрів аргону:

$$Q_7 = C_v \cdot V \cdot \Delta t, \quad (15)$$

де C_v – об'ємна теплоємність аргону, ($C_v = 0,22$ ккал/нм³·°С [7]);

V – витрата аргону, ($V = 0,9$ нм³/год.);

Δt – перепад температури аргону на виході і вході в піч, ($\Delta t = 600 - 20 = 580$ °С).

$$Q_7 = 0,22 \cdot 0,9 \cdot 580 = 115 \text{ ккал/год.}$$

8. Витрати тепла на нагрів і розплавлення шихти

$$Q_8 = \frac{m}{\tau} (r + C_p \cdot \Delta t), \quad (16)$$

де m – маса шихти в тиглі, ($m = 30$ кг);

τ – час нагріву і плавлення шихти ($\tau = 4$ год., приймаємо за умови механічної міцності кварцового скла, оскільки при 1500 °С кварцове скло стає м'яким);

Δt – різниця кінцевої і початкової температури шихти ($\Delta t = 1500 - 20 = 1480$ °С);

C_p – теплоємність силіцію, ($C_p = 0,181$ ккал/кг·град. [3]),

r – прихована теплота плавлення кремнію, ($r = 432,1$ ккал/кг [4]).

$$Q_8 = \frac{30}{4} \cdot (432,1 + 0,181 \cdot 1480) = 5250 \text{ ккал/год.}$$

Витрати тепла на нагрів графітового екранування.

$$Q_9 = \frac{m}{\tau} \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (17)$$

де m – маса графітового екранування;

C_p – теплоємність графіту, ($C_p = 0,1604$ ккал/кг·град [6]);

τ – час розігрівання графітового екранування, ($\tau = 2$ год.);

Δt – перепад температури в графітовому екрануванні, ($t = 1625 - 20 = 1605$ °С).

Графітовий нагрівач, підставка під кварцовий тигель і графітовий утримувач підставки мають кінцеву температуру:

$$t_{cp} = (1750 + 1500) / 2 = 1625 \text{ °С.}$$

Маса графітових деталей складає: нагрівач – 12 кг; підставка – 4,63 кг; труба – 1,32 кг.

Таким чином,

$$m = 12 + 4,63 + 1,32 = 17,95 \text{ кг.}$$

Кількість тепла на нагрів цих деталей складе:

$$Q_{9.1} = \frac{17,95}{2} \cdot 0,1604 \cdot 1605 = 2310 \text{ ккал/год.}$$

Середня температура усіх екранів складає 700 °С, тоді:

$$t = 700 - 20 = 680 \text{ °С};$$

Маса екранів складає: бічний екран – 17,5 кг; верхній екран – 2,6 кг; «лапи» (2 шт.) – 1,0 кг; захист піддону – 4,3 кг.

Сумарна маса екранів складе:

$$m = 17,5 + 2,6 + 1,0 + 4,3 = 25,4 \text{ кг.}$$

Кількість тепла на нагрів екранів складе:

$$Q_{9.2} = (25,4 / 2) \cdot 0,1604 \cdot 680 = 1385 \text{ ккал/год.}$$

Сумарна кількість тепла на нагрів графіту складе:

$$Q_9 = Q_{9.1} + Q_{9.2} = 2310 + 1385 = 3695 \text{ ккал/год.}$$

У зв'язку з тим, що увесь процес протікає при абсолютному тиску в камері вирощування 10 мм рт. ст. (т.ч. у вакуумі) конвективні тепловтрати можна не враховувати.

Таким чином, сумарні тепловтрати складуть:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 = \\ = 32348 + 3580 + 7208 + 16815 + 1016 + 8192 + 115 + 5250 + 3695 = 78219 \text{ ккал/год.}$$

Необхідна потужність електричного нагріву в початковий період прогрівання і плавлення шихти складе:

$$P = \frac{Q \cdot k}{860}, \quad (18)$$

де Q – сумарні теплові витрати ($Q = 78219$ ккал/год.)

k – коефіцієнт запасу потужності з урахуванням неврахованих втрат ($k = 1,1$).

$$P = \frac{78219 \cdot 1,1}{860} = 100 \text{ кВт.}$$

Завдання для самостійної роботи

Завдання 1. Індивідуальні завдання для розрахунку теплового вузла печі для вирощування монокристалів силіцію методом Чохральського наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Індивідуальні завдання для розрахунку теплового вузла печі

№ варі- анта	$D_{н.нагр.}$ мм	$D_{тигля}$ мм	M , кг	$T_{нагр.}$ °C	$T_{кор.}$ °C
1	100	335	31	1755	30
2	105	340	32	1761	35
3	110	330	29	1752	40
4	115	325	31	1755	45
5	102	335	32	1760	30
6	105	339	29	1753	35
7	110	333	31	1755	40
8	105	325	32	1760	45
9	110	335	29	1752	30
10	115	340	31	1751	35
11	103	332	32	1755	40
12	105	325	29	1760	45
13	115	335	31	1754	30
14	107	340	32	1760	35
15	105	334	29	1753	40
16	110	325	31	1755	45
17	105	339	32	1760	30
18	109	330	29	1752	35
19	115	325	32	1755	40
20	106	335	29	1751	45

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Мастрюков, Б. С.** Теория, конструкции и расчеты металлургических печей [Текст]. Т. 2 : Расчеты металлургических печей : учебник / Б. С. Мастрюков. – М. : Металлургия, 1978. – 272 с.
2. Графит особой чистоты в заготовках и деталях, ТУ 48-20-90-82.
3. **Тарабанов, А. А.** Силицированный графит [Текст] / А. А. Тарабанов, В. И. Костиков, - М. : Металлургия, 1977. – 206 с.
4. **Баранский, П. И.** Полупроводниковая электроника. Свойства материалов: справочник. [Текст] / П. И. Баранский, В. П. Ключков, И. В. Потыкевич. - К. : Наукова думка, - 1975. – 704 с.
5. **Реньян, В. Р.** Технология полупроводникового кремния. М. : Металлургия, - 1969. – 336 с.
6. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев. - М. : Госенергоиздат, - 1956. – 344 с.
7. **Воскресенский, К. Д.** Сборник расчетов и задач по теплопередаче [Текст] / К. Д. Воскресенский. - М. : Госенергоиздат, - 1959. – 335 с.
8. **Варгафтик, Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н. Б. Варгафтик. - М. : Физматгиз, 1963. - 708 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 - Коефіцієнт F для визначення нижньої межі частоти при нагріві сталевих заготівок

Заготівка	Відношення D_2 / a_2								
	0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	2,0
Пластина з D_2/b_2									
0	1,0	1,0	1,13	—	1,53	—	—	2,3	—
0,1	1,0	1,07	1,40	—	2,05	—	—	3,3	—
0,2	1,0	1,20	1,6	—	2,48	—	—	4,85	—
0,5	1,8	2,4	3,25	—	4,77	—	—	14,0	—
1,0	3,0	5,0	8,0	—	13,0	—	—	25,0	—
Циліндр	3,0	—	5,6	8,3	—	11,3	15,3	19	53

Таблиця А.2 - Поправочний коефіцієнт k_m для визначення коефіцієнта взаємної індукції

D_1/a_1	Відношення									
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
0	1,000	0,910	0,834	0,770	0,715	0,667	0,625	0,572	0,500	0,400
0,05	0,975	0,904	0,829	0,768	0,713	0,667	0,624	0,570	0,499	0,399
0,10	0,950	0,890	0,821	0,761	0,707	0,661	0,620	0,568	0,496	0,397
0,20	0,895	0,850	0,793	0,737	0,690	0,646	0,607	0,557	0,487	0,391
0,30	0,840	0,811	0,757	0,709	0,664	0,622	0,585	0,539	0,474	0,381
0,40	0,820	0,770	0,721	0,675	0,632	0,598	0,564	0,517	0,455	0,368
0,50	0,782	0,733	0,687	0,644	0,604	0,570	0,538	0,494	0,436	0,354
0,60	0,745	0,696	0,654	0,615	0,577	0,543	0,512	0,470	0,418	0,335
0,70	0,712	0,665	0,621	0,584	0,548	0,517	0,487	0,447	0,397	0,320
0,80	0,678	0,633	0,585	0,560	0,519	0,492	0,463	0,424	0,378	0,304
0,90	0,646	0,604	0,560	0,528	0,495	0,469	0,442	0,403	0,361	0,294
1,00	0,620	0,578	0,537	0,500	0,472	0,445	0,421	0,384	0,343	0,279

Таблиця А.3 - значення поправочного коефіцієнта k для обчислення коефіцієнта самоіндукції

D/a	k	D/a	k	D/a	k	D/a	k	D/a	k
0,00	1,0000	1,15	0,6573	2,60	0,4626	4,9	0,3238	13,0	0,1695
0,05	0,9791	1,20	0,6475	2,70	0,4537	5,0	0,3198	14,0	0,1605
0,10	0,9588	1,25	0,6381	2,80	0,4452	5,2	0,3122	15,0	0,1527
0,15	0,9391	1,30	0,6290	2,90	0,4370	5,4	0,3050	16,0	0,1457
0,20	0,9201	1,35	0,6201	3,00	0,4292	5,6	0,2971	17,0	0,1394
0,25	0,9016	1,40	0,6115	3,10	0,4217	5,8	0,2916	18,0	0,1336
0,30	0,8838	1,45	0,6031	3,20	0,4145	6,0	0,2854	19,0	0,1284
0,35	0,8665	1,50	0,5950	3,30	0,4075	6,2	0,2795	20,0	0,1236
0,40	0,8499	1,55	0,5871	3,40	0,4008	6,4	0,2739	22,0	0,1151
0,45	0,8337	1,60	0,5795	3,50	0,3944	6,6	0,2685	24,0	0,1079
0,50	0,8181	1,65	0,5721	3,60	0,3882	6,8	0,2633	26,0	0,1015
0,55	0,8031	1,70	0,5649	3,70	0,3822	7,0	0,2584	28,0	0,0959
0,60	0,7885	1,75	0,5579	3,80	0,3764	7,2	0,2537	30,0	0,0910
0,65	0,7745	1,80	0,5511	3,90	0,3708	7,4	0,2491	35,0	0,0808
0,70	0,7609	1,85	0,5444	4,00	0,3654	7,6	0,2448	40,0	0,0722
0,75	0,7478	1,90	0,5379	4,10	0,3602	7,8	0,2406	45,0	0,0664
0,80	0,7351	1,95	0,5316	4,2	0,3551	8,0	0,2366	50,0	0,0611
0,85	0,7228	2,00	0,5255	4,3	0,3502	8,5	0,2272	60,0	0,0528
0,90	0,7110	2,10	0,5137	4,4	0,3455	9,0	0,2185	70,0	0,0467
0,95	0,6995	2,20	0,5025	4,5	0,3409	9,5	0,2106	80,0	0,0419
1,00	0,6884	2,30	0,4918	4,6	0,3364	10,0	0,2033	90,0	0,0381
1,05	0,6777	2,40	0,4816	4,7	0,3321	11,0	0,1903	100,0	0,0350
1,10	0,6673	2,50	0,4719	4,8	0,3279	12,0	0,1790		

Таблиця 4 - Розрахункові коефіцієнти А і В

$D_1 I (\sqrt{2} \Delta_K)$	A	B	$D_1 I (\sqrt{2} \Delta_K)$	A	B
0	0	1,0	5,0	0,24	0,28
0,5	0,031	0,99	6,0	0,21	0,24
1,0	0,12	0,98	8,0	0,16	0,18
1,5	0,25	0,91	10	0,13	0,14
2,0	0,34	0,77	15	0,09	0,09
2,5	0,38	0,62	20	0,0707	0,0707
3,0	0,36	0,5	25	0,0565	0,0565
3,5	0,33	0,41	30	0,047	0,047
4,0	0,29	0,36	40	0,0353	0,0353

Таблиця А.5 - Фізичні параметри води

t, C	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$a, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	0,551	$1,790 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	13,7
10	0,575	$1,300 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$	9,56
20	0,600	$1,000 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	7,06
30	0,619	$8,05 \cdot 10^{-7}$	$1,47 \cdot 10^{-7}$	5,50
40	0,635	$6,59 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$	4,30
50	0,648	$5,66 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	3,56
60	0,660	$4,79 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$	3,00
70	0,669	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$	2,56
80	0,675	$3,66 \cdot 10^{-7}$	$1,64 \cdot 10^{-7}$	2,23
90	0,680	$3,26 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$	1,95

Таблиця А.6 - Коефіцієнт місцевого опору при повороті струменя на 360°

$D_{\text{тр.э}}$	Число Рейнольдса Re					
	3000	10000	50000	100000	250000	500000
8	0,400	0,270	0,184	0,161	0,1393	0,1273
10	0,391	0,264	0,180	0,1573	0,1362	0,1245
12	0,344	0,218	0,1485	0,1298	0,1124	0,1030
15	0,294	0,198	0,1350	0,1180	0,1024	$9,36 \cdot 10^{-2}$
20	0,254	0,1715	0,1170	0,1023	$8,85 \cdot 10^{-2}$	$8,12 \cdot 10^{-2}$
25	0,205	0,1385	$9,45 \cdot 10^{-2}$	$8,25 \cdot 10^{-2}$	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$6,54 \cdot 10^{-2}$
30	0,1715	0,1158	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$6,90 \cdot 10^{-2}$	$5,97 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-2}$
40	0,1435	$9,68 \cdot 10^{-2}$	$6,60 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$5,00 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-2}$
50	$9,80 \cdot 10^{-2}$	$6,61 \cdot 10^{-2}$	$4,51 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$

ДОДАТОК В

ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ І РОЗМІРНОСТІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Таблиця В.1 - Основні одиниці СІ

Величина	Одиниця			
	найменування	позначення		
		укр.	міжнар.	символ
Довжина	метр	м	m	L
Маса	кілограм	кг	kg	M
Час	секунда	с	s	T
Сила електричного струму	ампер	A	A	I
Термодинамічна температура	кельвін	K	K	Θ
Сила світла	кандела	кд	cd	J
Кількість речовини	моль	моль	mol	N

Таблиця В.2 - Додаткові одиниці СІ

Величина	Одиниця		
	найменування	позначення	
		укр.	міжнар.
Плоский кут	радіан	рад	rad
Тілесний кут	стерадіан	ср	sr

Таблиця В.3 - Позасистемні одиниці, їх зв'язок з одиницями СІ

Найменування величини	Одиниці вимірювання			
	найменування	позначення		співвідношення з одиницею СІ
		укр.	міжнар.	
1	2	3	4	5
Довжина	мікрон	мк	μ	1 мк = 10 ⁻⁶ м
	ангстрем	Å	Å	1 Å = 10 ⁻¹⁰ м
	світловий рік	св. рік	l.y.	1 св. рік = 9,46·10 ¹⁵ м
	парсек	пк	pc	1 ПК = 3,09·10 ¹⁶ м
	астрономічна одиниця	а.о.	AU	1 а.о. = 1,50·10 ¹¹ м
Маса	тонна	т	t	1 т = 10 ³ кг
	центнер	ц	q	1 ц = 100 кг
	атомна одиниця маси	а.о.м.	u	1 а.о.м. = 1,66·10 ⁻²⁷ кг
Час	хвилина	хв	min	1 хв = 60 с
	година	год	h	1 год = 3600 с
	доба	доба	d	1 доба = 86 400 с
Плоский кут	градус	°	°	1° = π/180 = 1,75·10 ⁻² рад
	мінута	'	'	1' = π/108·10 ⁻² = 2,91·10 ⁻⁴ рад
	секунда	''	''	1'' = π/648·10 ⁻³ = 4,85·10 ⁻⁶ рад

Подовження табл. В.3

1	2	3	4	5
Площа	ар	а	а	$1 \text{ а} = 10^2 \text{ м}^2$
	гектар	га	ha	$1 \text{ га} = 10^4 \text{ м}^2$
Об'єм	літр	л	L (l)	$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$
Кут повороту	оберт	об	rev	$1 \text{ об} = 2\pi \text{ рад}$
Частота обертання (кутова швидкість)	оберт за секунду	об/с	rev/s	$1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$
	оберт за хвилину	об/хв	rev/min	$1 \text{ об/хв} = 0,0167 \text{ с}^{-1}$
Сила (вага)	кілограм-сила	кгс	kgf	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
	тонна-сила	тс	Tf, tf	$1 \text{ тс} = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Н}$
Робота	ват-год	Вт-год	Wh	$1 \text{ Вт-год} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$
Енергія	електрон-вольт	eВ	eV	$1 \text{ eВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Теплота	калорія	кал	cal	$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$
Потужність	кінська сила	к. с.	h. p.	$1 \text{ к. с.} = 735,5 \text{ Вт}$
Тиск	бар	бар	bar	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$
	міліметр ртутного стовпчика	мм рт. ст.	mm Hg	$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3224 \text{ Па}$
	торр	Торр	Torr	$1 \text{ Торр} = 1/760 \text{ атм} = 133,3224 \text{ Па}$
	міліметр водяного стовпчика	мм вод. ст.	mm H ₂ O	$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}$
	стандартна атмосфера	атм	atm	$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$
	кілограм-сила на квадратний сантиметр	кгс/см ²	kgf/cm ²	$1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$
	технічна атмосфера	ат	at	$1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$
Температура	градус Цельсія	°С	°C	$1^\circ\text{C} = 1 \text{ К}$
Логарифмічна величина	бел	Б	B	—
	децибел	дБ	dB	—
Напруження (механічне)	кілограм-сила на квадратний міліметр	кгс/мм ²	kgf/mm ²	$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \cdot 10^6 \text{ Па}$
Напруженість магнітного поля	ерстед	Е	Oe	$1 \text{ Е} = 79,5775 \text{ А/м}$
Доза випромінювання	рад	рад	rad	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг}$
Потужність дози випромінювання	рад за секунду	рад/с		$1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Вт/кг}$
Експозиційна доза	рентген	R	R	$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Активність ізотопу	кюрі	Ki	Ci	$1 \text{ Ki} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$
Відносна величина	відсоток	%	%	$1\% = 10^{-2}$
	мільйонна частка	млн ⁻¹	mln ⁻¹	$1 \text{ млн}^{-1} = 10^{-6}$

Таблиця В.3 - Похідні одиниці СІ, що мають власні найменування

Величина	Одиниця			Вираження похідної одиниці	
	найменування	позначення		через інші одиниці СІ	через основні та додаткові одиниці СІ
		укр.	міжнар.		
Частота	герц	Гц	Hz	–	c^{-1}
Рівень інтенсивності звуку, звукового тиску	бел, децибел	Б, дБ	B, dB	1	1
Сила, вага	ньютон	Н	N	$м \cdot кг \cdot c^{-2}$	$м \cdot кг \cdot c^{-2}$
Тиск, механічне напруження, модуль пружності	паскаль	Па	Pa	$Н/м^2$	$м^{-1} \cdot кг \cdot c^{-2}$
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж	J	Н·м	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2}$
Потужність, потік енергії	ват	Вт	W	Дж/с	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3}$
Електричний заряд	кулон	Кл	C	А·с	А·с
Електрична напруга, електричний потенціал, електрорушійна сила	вольт	В	V	Вт/А	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	фарада	Ф	F	Кл/В	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Електричний опір	ом	Ом	Ω	В/А	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	сименс	См	S	Ом ⁻¹	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Магнітний потік, потік магнітної індукції	вебер	Вб	Wb	В·с	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція, густина магнітного потоку	тесла	Тл	T	Вб/м ²	$кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	генрі	Гн	H	Вб/А	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Оптична сила	діоптрія	дптр	D	м ⁻¹	м ⁻¹
Світловий потік	люмен	лм	lm	кд·ср	кд·ср
Освітленість	люкс	лк	lx	лм/м ²	кд·ср·м ⁻²
Активність радіоактивного джерела	беккерель	Бк	Bq	c^{-1}	c^{-1}
Поглинена доза	грей	Гр	Gy	Дж/кг	$м^2 \cdot c^{-2}$
Еквівалентна доза	зиверт	Зв	Sv	Дж/кг	$м^2 \cdot c^{-2}$

ДОДАТОК Г

ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ І РОЗМІРНОСТІ ОСНОВНИХ ВЕЛИЧИН У СИСТЕМІ СІ

Таблиця Г.1 - Співвідношення між значеннями температури в різних шкалах

Температура	Еквівалент за шкалою	
	Цельсія	Кельвіна
$X \text{ } ^\circ\text{C}$ (шкала Цельсія)	$X \text{ } ^\circ\text{C}$	$(X + 273,15) \text{ K}$
$X \text{ } ^\circ\text{R}$ (шкала Реомюра)	$\frac{5}{4}X \text{ } ^\circ\text{C}$	$\frac{5}{4}X + 273,15 \text{ K}$
$X \text{ } ^\circ\text{f}$ (шкала Фаренгейта)	$\frac{5}{9}(X - 32) \text{ } ^\circ\text{C}$	$\frac{5}{9}X + 255,38 \text{ K}$
$X \text{ } ^\circ\text{Ra}$ (шкала Ренкіна)	$\frac{5}{9}X - 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\frac{5}{9}X \text{ K}$
$X \text{ K}$ (шкала Кельвіна)	$(X - 273,15) \text{ } ^\circ\text{C}$	$X \text{ K}$

Таблиця Г.2 - Співвідношення між одиницями (градусами) різних шкал

Одиниця	K	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{F}$	$^\circ\text{Rank}$	$^\circ\text{R}$
Кельвін, K	1	1	1,8	1,8	0,8
Градус Цельсія, $^\circ\text{C}$	1	1	1,8	1,8	0,8
Градус Фаренгейта, $^\circ\text{F}$	0,556	0,556	1	1	0,445
Градус Ренкіна, $^\circ\text{Ra}$	0,556	0,556	1	1	0,445
Градус Реомюра, $^\circ\text{R}$	1,25	1,25	2,25	2,25	1