

669.02

Є 302

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



В.М. Очинський
Ю.В. Куріс
Т.М. Нестеренко

КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Методичні вказівки
до виконання практичних занять і самостійної роботи

для студентів ЗДІА
спеціальності 6.050401 “Металургія кольорових металів”

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

**Методичні вказівки
до виконання практичних занять і самостійної роботи**

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.050401 “Металургія кольорових металів”*

*Затверджено до видання
на засіданні кафедри
протокол №13 від 21.01.2016 р.*

Запоріжжя
2016

ББК 669.02
Є 302

*В.М. Очинський, доцент,
Ю.В. Куріс, д.т.н., професор,
Т.М. Нестеренко, к.т.н., доцент*

Відповідальний за випуск: *в.о. зав. кафедрою МКМ,
к.т.н., доцент В.Р. Румянцев*

Очинський В.М.

Конструкції технологічних агрегатів кольорової металургії: методичні вказівки для виконання практичних занять і самостійної роботи для студентів ЗДІА спеціальності 6.050401 «Металургія кольорових металів» / В. М. Очинський, Ю. В. Куріс, Т. М. Нестеренко; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2015. – 44 с.

Методичні вказівки призначені для студентів напряму «Металургія», які виконують практичні завдання з дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів кольорової металургії». Методичні вказівки містять теоретичні відомості та приклади технологічних розрахунків щодо агрегатів кольорової металургії, довідкові матеріали та індивідуальні завдання до виконання розрахунків.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 РОЗРАХУНКИ НАГРІВУ І ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛУ	5
1.1 Задача №1	9
1.2 Індивідуальні завдання.....	12
2 РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ.....	13
2.1 Задача №2	13
2.2 Індивідуальні завдання.....	22
3 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО ВУЗЛА ПЕЧІ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО	24
3.1 Задача №3	24
3.2 Індивідуальні завдання.....	34
ТЕМИ САМОСТІЙНИХ РОБІТ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	36
ДОДАТОК А	37
ДОДАТОК Б	40
ДОДАТОК В	41
ДОДАТОК Г	44

ВСТУП

Нині необхідно планомірно проводити в усіх галузях народного господарства цілеспрямовану енергозберігаючу політику. У зв'язку з цим, великі завдання поставлені перед металургійною промисловістю, яка є однією з головних енергоємних галузей народного господарства. Металургійні печі – основні споживачі енергії в металургії. Раціональна організація теплової роботи металургійних печей не лише визначає високу ефективність їх роботи, але і значною мірою впливає на якість вироблюваної продукції. Знання закономірностей процесів теплообміну, розуміння суті теплових процесів, що відбуваються в металургійних агрегатах, є необхідним для металурга. Проте треба не лише мати знання, але і уміти його застосовувати, зокрема уміти розраховувати процеси теплообміну при нагріві, плавленні і обробці металу, рух рідин і газів по трубах, каналах і в робочому просторі печі; процеси горіння палива в печі і тому подібне.

У методичних вказівках представлені описи розрахункових і практичних завдань, які виконують студенти металургійного факультету ЗДІА, що навчаються за фахом «Металургія кольорових металів». Надані приклади розрахунків допоможуть студентам при виконанні домашніх завдань, курсовому і дипломному проектуванні.

1 Розрахунки нагріву і охолодження металу

Як правило, нагрівання в промислових печах не є симетричним, що враховується розрахунковою товщиною виробу, що визначається за формулою:

$$S = \mu \cdot \delta, \quad (1.1)$$

де δ – геометрична товщина тіла, м;

μ – коефіцієнт несиметричної нагріву (при односторонньому нагріві $\mu=1$, при двосторонньому $\mu=0,5$).

У разі первинного параболічного розподілу температури (наприклад, під час переходу металу з методичної в зварювальну зону методичної печі) як первинна температура в температурному критерії слід використовувати середню температуру металу.

Розрахунок випромінювання сірих тіл

Щільність півсферичного випромінювання сірих тіл визначається за законом Стефана – Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot (T/100)^4, \quad (1.2)$$

де $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – міра чорноти;

T – абсолютна температура, К.

Згідно із законом Кирхгофа міра чорноти випромінювання сірих тіл дорівнює їх поглинальній здатності – A , т. е.

$$\varepsilon = A. \quad (1.3)$$

Міра чорноти об'єму продуктів згорання може бути знайдена за формулою:

$$\epsilon_{\Gamma} = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (1.4)$$

де ϵ_{CO_2} – міра, чорнота вуглекислого газу, що міститься в продуктах згорання;

$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ – міра чорноти водяної пари;

β – поправочний коефіцієнт.

Міри чорноти CO_2 і H_2O є функціями температури T і парціального тиску p на ефективну довжину променя $S_{\text{еф}}$, т.е. $pS_{\text{еф}}$.

Значення ϵ_{CO_2} , $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ і поправочного коефіцієнта β знаходять по номограмах, приведених на рис. 1, 2 і 3.

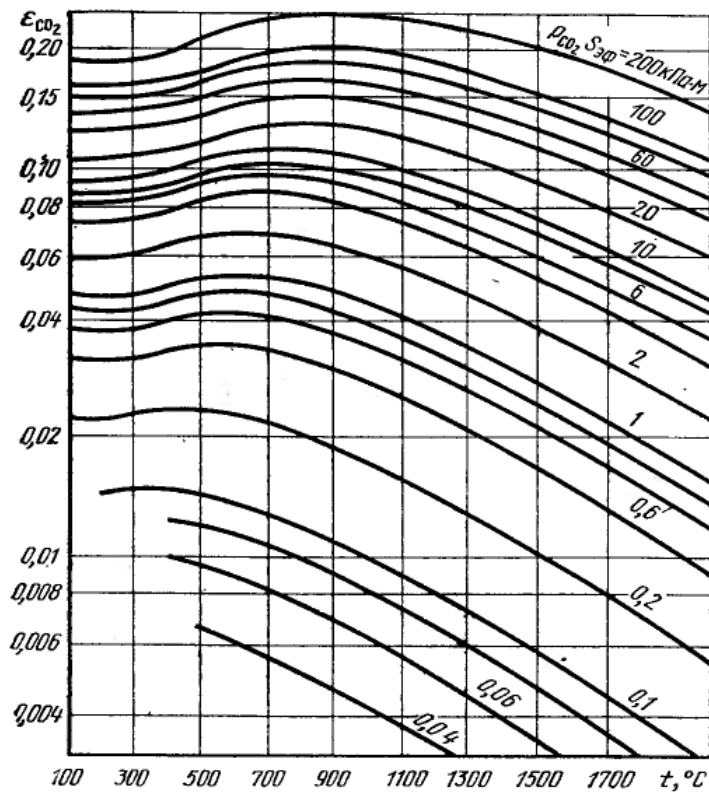


Рисунок 1 – Номограма для визначення міри чорноти CO_2

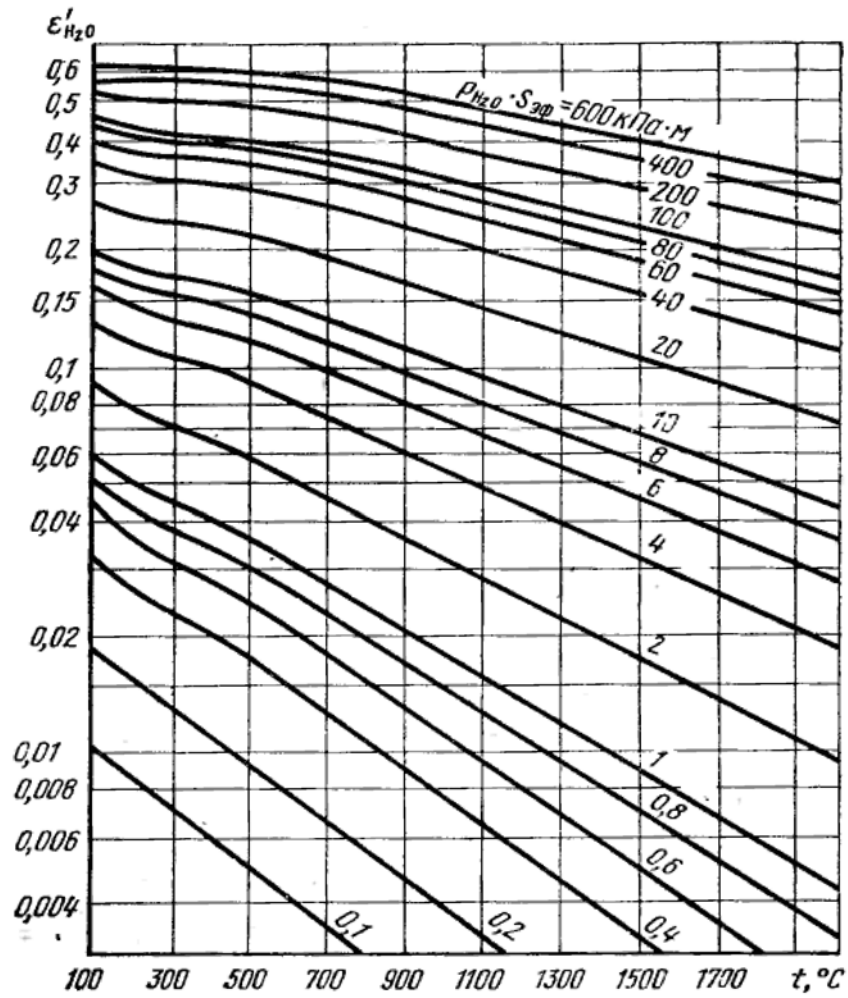


Рисунок 2 – Номограма для визначення міри чорноти H_2O

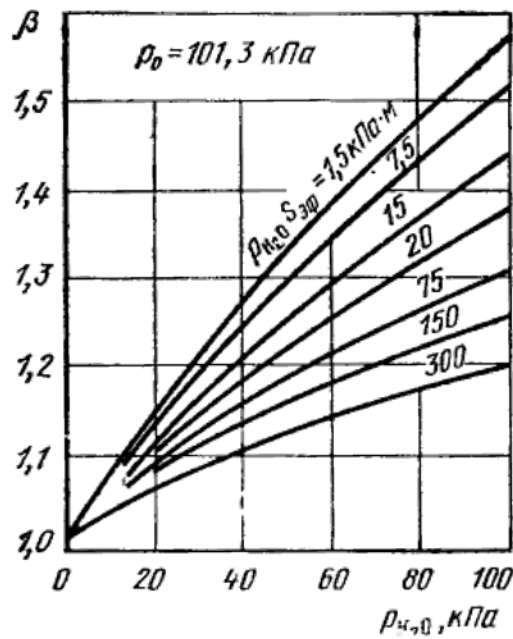


Рисунок 3 – Монограма для визначення поправочного коефіцієнту β

Ефективна довжина променя визначається за формулою:

$$S_{\text{эф}} = \eta \frac{3,6 \cdot V}{F}, \quad (1.5)$$

де V – об'єм, заповнений випромінюючим газом, м^3 ;

F – площа стінок, обмежуючих цей об'єм, м^2 ;

η – коефіцієнт, зазвичай приймають рівним 0,9–1,0.

У регенеративних насадках ефективну довжину променя знаходять за формулою:

$$S_{\text{эф}} = 3,6 \cdot (1 - v) / f_1, \quad (1.6)$$

де v – питомий об'єм насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

f_1 – питома поверхня нагріву, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

При спалюванні мазуту або висококалорійного газу в продуктах згорання часто знаходяться частки саж, що значно збільшують міру чорноти газового об'єму.

Приведена міра чорноти системи в робочій камері печі безперервного дії розраховують за формулою:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{м}} \cdot \frac{\omega + 1 - \varepsilon_{\text{г}}}{[\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{г}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}} + \omega}, \quad (1.7)$$

де $\varepsilon_{\text{м}}$ – міра чорноти стрічки;

ω – міра розвитку кладки.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, при постійній температурі печі, розраховують за формулою:

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \sqrt{\left[(T_{\text{Г}} / 100)^4 - (T_{\text{М}}^{\text{поч}} / 100)^4 \right] \cdot \left[(T_{\text{Г}} / 100)^4 + (T_{\text{М}}^{\text{кін}} / 100)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}^{\text{поч}}) \cdot (T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}^{\text{кін}})}},$$

Вт/(м²·К). (1.8)

де індекси «поч» и «кін» означають температури газу и металу відповідно на початку і по закінченню періоду нагріву.

Температуру, яку матиме тонке тіло через час нагріву τ , можна визначити за формулою:

$$T = T_{\text{д}} - (T_{\text{д}} - T_{\text{п}}) \cdot e^{-\frac{K \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot \tau}{S \cdot \rho \cdot c}},$$

(1.9)

$T_{\text{д}}$ – температура довкілля, °С;

$T_{\text{п}}$ – початкова температура нагріву, °С;

S – характерний розмір тіла, м;

ρ – щільність тіла, кг/м³;

c – теплоємність тіла, кДж/кг·К;

K – коефіцієнт форми, (для пластини $K=1$).

1.1 Задача №1

Умови задачі

Визначити температуру стрічки з середньовуглецевої сталі на виході з камери нагріву протяжної печі.

Початкова температура стрічки $T_{\text{п}} = 293$ К, температура продуктів згорання палива $T_{\text{Г}} = 1073$ К.

В продуктах згорання міститься 9 % CO_2 и 18 % H_2O .

Товщина стрічки $\delta = 0,002$ м, ширина $b = 1$ м. Ширина печі $B = 1,5$ м, висота $2H = 1$ м. Нагрів стрічки – двосторонній, час нагріву $\tau = 35$ с.

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, приймаючи орієнтовно, що $T_{\text{кін}} = 973$ К.

Приклад рішення

Знайдемо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Ефективну довжину променя в газовому шарі визначаємо за формулою (1.5):

$$S_{\text{эф}} = \frac{3,6 \cdot B \cdot H}{2 \cdot (B + H)} = \frac{3,6 \cdot 1,5 \cdot 0,5}{2 \cdot (1,5 + 0,05)} = 0,675 \text{ м.}$$

Міра розвитку кладки:

$$\omega = \frac{F_{\text{кл}}}{F_{\text{м}}} = \frac{2 \cdot (B + 2 \cdot H)}{2 \cdot b} = \frac{2 \cdot (1,5 + 1)}{2 \cdot 1} = 2,5.$$

Парціальні тиски випромінюючих газів:

$$P_{\text{CO}_2} = 0,09 \cdot 98,1 = 8,82 \text{ кПа,}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,18 \cdot 98,1 = 17,64 \text{ кПа.}$$

Твори парціальних тисків CO_2 и H_2O на ефективну довжину променя:

$$P_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{эф}} = 8,82 \cdot 0,675 = 5,95 \text{ кПа} \cdot \text{м,}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эф}} = 17,64 \cdot 0,675 = 11,90 \text{ кПа} \cdot \text{м.}$$

По графіках приведених на рисунках 1–3 знаходимо значення міри чорноти вуглекислого газу (ϵ_{CO_2}) і міри чорноти водяної пари ($\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$) що містяться в продуктах згорання і поправочного коефіцієнта β :

$$\epsilon_{\text{CO}_2} = 0,095; \quad \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,16; \quad \beta = 1,1.$$

Загальна міра чорноти об'єму продуктів згорання (ф-ла 1.4):

$$\varepsilon_{\Gamma} = 0,09 + 1,1 \cdot 1,16 = 0,266.$$

Приймаючи міру чорноти стрічки $\varepsilon_M = 0,8$ знаходимо приведену міру чорноти системи (ф-ла 1.7):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 0,8 \cdot \frac{2,5 + 1 - 0,266}{[0,8 + 0,266 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,266}{0,266} + 2,5} = 0,178.$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням при постійній температурі печі (ф-ла 1.8):

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{5,7 \cdot 0,178 \sqrt{[(1073/100)^4 - (293/100)^4]} \cdot [(1073/100)^4 + (973/100)^4]}{\sqrt{(1073 - 293) \cdot (1073 - 973)}} =$$

$$= 271,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Приймаючи $\alpha_{\text{конв}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, знаходимо сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}},$$

$$\alpha_{\Sigma} = 271,5 + 25 = 296,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Температура стрічки на виході з камери нагріву печі (формула 1.9):

$$t = 800 - (800 - 20) \cdot e^{-\frac{1 \cdot 296,5 \cdot 35}{0,001 \cdot 7850 \cdot 0,62 \cdot 10^3}} = 718 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

тобто близько до набутого значення.

При розрахунку прийнято, що щільність сталі $\rho = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3$ і середня теплоємність середньовуглецевої сталі $c = 0,62 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

1.2 Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання для розрахунку температури металеві стрічки на виході з камери нагріву печі наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Індивідуальні завдання для розрахунку температури металеві стрічки

№	$T_{\text{п}}$	$T_{\text{г}}$	$T_{\text{кін}}$	CO_2	H_2O	δ	B	$2H$	τ
	К	К	К	%	%	м	м	м	с
1	295	1101	950	8,0	19	0,0025	1,3	0,8	29
2	297	1099	952	8,5	17	0,0030	1,4	0,9	30
3	299	1097	954	9,0	19	0,0035	1,5	1,0	31
4	301	1095	956	9,5	17	0,0025	1,6	1,1	32
5	303	1093	958	10,0	19	0,0030	1,7	1,2	33
6	305	1091	960	8,0	17	0,0035	1,8	0,8	34
7	307	1089	962	8,5	19	0,0025	1,3	0,9	36
8	309	1087	964	9,0	17	0,0030	1,4	1,0	37
9	311	1085	966	9,5	19	0,0035	1,5	1,1	38
10	313	1083	968	10,0	17	0,0025	1,6	1,2	39
11	315	1081	970	8,0	19	0,0030	1,7	0,8	40
12	317	1079	972	8,5	17	0,0035	1,8	0,9	41
13	319	1077	974	9,0	19	0,0025	1,3	1,0	42
14	321	1075	976	9,5	17	0,0030	1,4	1,1	43
15	323	1073	978	10,0	19	0,0035	1,5	1,2	44
16	295	1101	980	8,0	19	0,0025	1,3	0,8	29
17	297	1099	982	8,5	17	0,0030	1,4	0,9	30
18	299	1097	984	9,0	19	0,0035	1,5	1,0	31
19	301	1095	986	9,5	17	0,0025	1,6	1,1	32
20	303	1093	988	10,0	19	0,0030	1,7	1,2	33

2 Розрахунок індукційної установки

Розрахунок установки індукційного нагріву включає тепловий розрахунок, в результаті якого визначають час нагріву і необхідну питому потужність, і електричний розрахунок, який дозволяє знайти геометричні параметри індуктора, потужність, що підводиться до індуктора, силу, струму і напруга на затискачах індуктора.

Розрахунок індукційної установки значно ускладнюється змінною електротехнічних параметрів металу, що нагрівається, із зміною його температури і напруженості магнітного поля, що викликає появу електричного струму у виробі.

2.1 Задача №2

Умова задачі

Розрахувати індукційну установку для нагріву металевих заготовок перед пресом.

Діаметр заготовки $D_2 = 150$ мм, а довжина $a_2 = 400$ мм. Температура нагріву $t_{\text{пов}}^{\text{кои}} = 1100$ °С, допустимий перепад температур по перерізу деталі $\Delta t = 150$ °С.

Приклад рішення

Тепловий розрахунок режиму нагріву

Виберемо оптимальну частоту нагріву. Нижню межу частоти знаходимо з нерівності:

$$f \geq \frac{F}{D_2^2}, \quad (2.1)$$

де D_2 – діаметр заготовки, м;

F – коефіцієнт залежний від відношення D_2/a_2 і форми пластини.

$$f \geq \frac{7,963}{0,150^2} = 353,911 \text{ Гц.}$$

Коефіцієнт F для $D_2/a_2 = 0,375$ знайдено інтерполяцією по табл.1 Додаток А, ($F = 7,963$).

«Гаряча» глибина проникнення струму в метал:

$$\Delta_k = \frac{0,503}{\sqrt{f}} = \frac{0,503}{\sqrt{353,911}} = 0,027 \text{ м.}$$

Оскільки набуто значення $\Delta_k < 0,2 \cdot D_2$ ($0,027 < 0,03$), то глибина активного шару дорівнює $\varepsilon = \Delta_k$, і розрахунковий діаметр заготовки:

$$D_2' = D_2 - \varepsilon = 0,15 - 0,027 = 0,123 \text{ м.}$$

Час нагріву однієї заготовки знаходимо за формулою:

$$\tau_k = K \cdot 10^4 \cdot (D_2')^2 = 3,7 \cdot 10^4 \cdot 0,123^2 = 559,773 \text{ с.}$$

Коефіцієнт $K=3,7 \text{ с/м}^2$ узято з табл. 47 [1], для випадку нагріву при постійній питомій потужності і $\Delta t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Маса заготовки:

$$G = \frac{\pi \cdot D_2'^2}{4} \cdot a_2 \cdot \gamma, \quad (2.2)$$

де γ - густина матеріалу заготовки, кг/м^3 ;

$$G = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} \cdot 0,4 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 55,107 \text{ кг.}$$

Середня корисна потужність установки знаходимо за формулою:

$$P_r = \frac{G \cdot \bar{c} \cdot \bar{t}}{\tau_k}; \quad (2.3)$$

де \bar{t} – середня температура заготовки, $^\circ\text{C}$; $\bar{t} = t_{\text{пов}} - 0,5\Delta t$;

\bar{c} – середня теплоємність матеріалу заготовки в інтервалі температур $(0 - \bar{t})$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ (Додаток Б).

$$P_T = \frac{55,107 \cdot 0,683 \cdot 1025}{559,773} = 68,919 \text{ кВт.}$$

Електричний розрахунок індуктора

Діаметр індуктора знаходимо за формулою:

$$D_1 = 2 \cdot D_2,$$

$$D_1 = 2 \cdot 0,150 = 0,30 \text{ м.}$$

Довжина індуктора складе (приймаючи режим роботи установки періодичним):

$$a_1 = a_2 + 1,250 \cdot D_1 = 0,40 + 1,250 \cdot 0,30 = 0,775 \text{ м.}$$

Коефіцієнт приведення параметрів системи:

$$\alpha = \frac{k_m^2}{k_2^2 + A^2}; \quad (2.4)$$

де $k_m = f(D_1/a_1; a_1/a_2)$ знаходять по табл. 2, Додаток А;

$k = f(D_2/a_2)$ знаходять по табл. 3, Додаток А;

$A = f(D_2/(\sqrt{2} \cdot \Delta_k))$ знаходять по табл. 4, Додаток А.

$$\alpha = \frac{0,455^2}{0,858^2 + 0,294^2} = 0,252.$$

Приведені спротиви заготівки

Активний опір, визначаємо за формулою:

$$r_2' = a \cdot \pi \cdot c_2 \cdot \frac{A \cdot D_2^2}{2 \cdot a_2 \cdot D_k^2}, \quad (2.5)$$

де ρ_2 – питомий опір матеріалу заготівки, Ом·м.

$$r_2' = 0,252 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,294 \cdot 0,150^2}{2 \cdot 0,400 \cdot 0,027^2} = 8,975 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Реактивний опір, визначаємо за формулою:

$$x_2' = 2ak_2(1 - B) \cdot \pi \cdot f \frac{\pi^2 D_2^2}{a_2^2} \cdot 10^{-7}, \quad (2.6)$$

$$x_2' = 0,252 \cdot 0,858 \cdot (1 - 0,365) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 353,911 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,150^2}{0,400^2} \cdot 10^{-7} = \\ = 4,231 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Опір індуктора

Омічний опір визначаємо за формулою:

$$r_{III} = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot D_1'}{a_1 \cdot \delta_1 \cdot g}, \quad (2.7)$$

де g – коеф. заповнення, $g = 0,7-0,9$.

$$r_{III} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,3049}{0,775 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8} = 2,059 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Активний опір:

$$r_1 = k_r \cdot r_{III}, \quad (2.8)$$

$$r_1 = 1,3 \cdot 2,059 \cdot 10^{-5} = 2,677 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Реактивний опір:

$$x_1 = k_r [2\pi f \frac{\pi^2 \cdot D_1^2}{a_1^2} \cdot 10^{-7} + k_x r_{III}], \quad (2.9)$$

$$x_1 = 0,850 \cdot \left(2 \cdot 3,14 \cdot 353,911 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,300^2}{0,775^2} \cdot 10^{-7} + 1,1 \cdot 2,059 \cdot 10^{-5} \right) = \\ = 35,101 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Еквівалентні спротиви системи індуктор – заготівка

Активний опір:

$$r_{\ominus} = r_1 + r_2' = 2,677 \cdot 10^{-5} + 0,898 \cdot 10^{-5} = 3,575 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Реактивний опір:

$$x_{\ominus} = x_1 + x_2' = 35,101 \cdot 10^{-5} + 4,231 \cdot 10^{-5} = 39,332 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Повний опір:

$$z_{\ominus} = \sqrt{(3,575 \cdot 10^{-5})^2 + (39,332 \cdot 10^{-5})^2} = 39,459 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт корисної дії індуктора:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{r_2'}{r_{\ominus}} = \frac{0,898 \cdot 10^{-5}}{3,575 \cdot 10^{-5}} = 0,251.$$

Коефіцієнт потужності індуктора:

$$\cos \varphi_{\text{и}} = \frac{r_{\ominus}}{z_{\ominus}} = \frac{3,575 \cdot 10^{-5}}{39,459 \cdot 10^{-5}} = 0,091.$$

Втрати тепла виробом, що нагрівається

Випромінюванням:

$$P_{\text{пот}}^{\text{изл}} = \frac{5,7 \cdot 10^{-3} \left[\left(\frac{550 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{40 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,14 \cdot 0,150 \cdot 0,400}{\frac{1}{0,800} + \left(\frac{1}{0,450} - 1 \right) \cdot \frac{3,14 \cdot 0,150 \cdot 0,400}{3,14 \cdot 0,300 \cdot 0,775}} = 3,082 \text{ кВт};$$

Теплопровідністю:

$$P_{\text{пот}}^{\text{тепл}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,830 \cdot 10^{-2} \cdot 0,775 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{550 - 40}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{0,300}{0,150}\right)} = 0,102 \text{ кВт.}$$

Сумарна споживана потужність:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{T}} + P_{\text{пот}}^{\text{изл}} + P_{\text{пот}}^{\text{тепл}},$$

$$P_{\Sigma} = 40 + 3,082 + 0,102 = 43,184 \text{ кВт.}$$

Сила струму в одновитковому індукторі:

$$I_{\text{и}}' = \sqrt{\frac{P_{\Sigma} \cdot 10^3}{r_2}} = \sqrt{\frac{43,184 \cdot 10^3}{0,898 \cdot 10^{-5}}} = 6,935 \cdot 10^4 \text{ А.}$$

Напруга на одновитковому індукторі:

$$U_{\text{и}}' = z_{\text{э}} \cdot I_{\text{и}}', \quad (2.10)$$

$$U_{\text{и}}' = 39,459 \cdot 10^{-5} \cdot 6,935 \cdot 10^4 = 27,365 \text{ В.}$$

Потужність, підведена до індуктора:

$$P = \frac{P_{\text{T}}}{\eta_{\text{и}}} = \frac{40}{0,251} = 159,363 \text{ кВт.}$$

Приймаємо напругу на індукторі $U_{\text{и}} = 750 \text{ В}$ і знаходимо число витків:

$$\omega = \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{и}}'} = \frac{750}{27,365} = 28.$$

Мінімальна товщина ізоляції:

$$\Delta_{\text{из}} = \frac{U_{\text{и}} \cdot 10^{-3}}{25 \cdot \omega} = \frac{750 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 28} = 1,071 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо проміжок $\Delta_{из} = 1,1$ мм.

Оскільки прийнятий проміжок мало відрізняється від розрахованого, залишаємо коефіцієнт заповнення таким, яким він був прийнятий при розрахунку ($g=0,8$). В цьому випадку робити розрахунок опорів індуктора не потрібно.

Еквівалентні спротиви багатовиткового індуктора дорівнюють:

$$r_9 = \omega^2 \cdot (r_1 + r_2'),$$

$$r_9 = 28^2 \cdot (2,677 \cdot 10^{-5} + 0,898 \cdot 10^{-5}) = 2,803 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$x_9 = \omega^2 \cdot (x_1 + x_2'),$$

$$x_9 = 28^2 \cdot (35,101 \cdot 10^{-5} + 4,231 \cdot 10^{-5}) = 30,836 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$z_9 = \sqrt{(2,803 \cdot 10^{-2})^2 + (30,836 \cdot 10^{-2})^2} = 30,96310^{-2} \text{ Ом}.$$

Сила струму в багатовитковому індукторі:

$$I_n = \frac{I_{и}'}{\omega} = \frac{6,935 \cdot 10^4}{28} = 2476,786 \text{ А}.$$

Активна потужність установки:

$$P_a = I_n^2 \cdot r_9 \cdot 10^{-3},$$
$$P_a = 2476,786^2 \cdot 2,803 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} = 171,949 \text{ кВт}.$$

Втрати на індукторі:

$$P_{на} = P_a - P_{\Sigma},$$

$$P_{на} = 171,949 - 43,184 = 128,765 \text{ кВт}.$$

Реактивна потужність установки:

$$P_p = I_n^2 \cdot x_9 \cdot 10^{-3},$$

$$P_p = 2476,786^2 \cdot 30,836 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} = 1891,625 \text{ кВАр.}$$

Місткість конденсаторної батареї, необхідна для компенсації реактивної потужності:

$$C = \frac{P_p \cdot 10^9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{ли}^2}, \quad (2.11)$$

$$C = \frac{1891,625 \cdot 10^9}{2 \cdot 3,14 \cdot 353,911 \cdot 750^2} = 1513,069 \text{ мкФ.}$$

Розрахунок охолодження індуктора

Повна потужність, що відводиться водою, що охолоджує:

$$P_{охл} = P_{на} + P_{пот}^{изл} + P_{пот}^{тепл},$$

$$P_{охл} = 128,765 + 3,082 + 0,102 = 131,949 \text{ кВт.}$$

Необхідна кількість води:

$$G_{охл} = \frac{P_{охл} \cdot 10^{-3}}{c_B \cdot (t_{вых} - t_{вх})}, \quad (2.12)$$

$$G_{охл} = \frac{131,949 \cdot 10^{-3}}{4,187 \cdot (50 - 10)} = 0,788 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Оскільки швидкість води не повинна перевищувати $\omega_B = 1,5 \text{ м/с}$, знайдемо необхідну площу перерізу трубки індуктора, вважаючи, що число секцій дорівнює $n = 1$:

$$S_{тр} = \frac{G_{охл}}{1,5} = \frac{0,788 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 0,525 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 5,25 \text{ см}^2.$$

Цьому перерізу відповідає еквівалентний діаметр:

$$d_{\text{тр.э.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{тр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,25}{3,14}} = 2,586 \text{ см.} \approx 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Кінематичний коефіцієнт в'язкості при середній температурі води при 30 °С дорівнює $\nu_B = 8,05 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, табл. 5, Додаток А.

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_B \cdot d_{\text{тр.э.}}}{\nu_B}, \quad (2.13)$$

де ν_B - кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_2 – питомий опір матеріалу заготовки, $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

$$Re = \frac{1,5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2}}{8,05 \cdot 10^{-7}} = 48447.$$

При $Re > 10000$ число Нуссельта знаходимо таким чином:

$$Nu = 0,023 \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{d_{\text{тр.э.}}}{D_1 + d_{\text{тр.э.}}} \right) \cdot Pr_B^{0,43} \cdot Re_B^{0,8}, \quad (2.14)$$

$$Nu = 0,023 \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{2,6 \cdot 10^{-2}}{0,3 + 2,6 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot 5,50^{0,43} \cdot 48447^{0,8} = 343,793.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією:

$$\alpha^{\text{конв}} = Nu \cdot \frac{\lambda_B}{d_{\text{тр.э.}}}, \quad (2.15)$$

$$\alpha^{\text{конв}} = 343,793 \cdot \frac{0,619}{2,6 \cdot 10^{-2}} = 8184,918 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Кількість тепла, що фактично відводиться водою:

$$P_{\text{отв}} = a_{\text{конв}} F_{\text{охл}} (t_u - t_B) \cdot 10^{-3}, \quad (2.16)$$

$$P_{\text{отв}} = 8184,918 \cdot 0,874 \cdot (50 - 30) \cdot 10^{-3} = 286,014 \text{ кВт.}$$

$$F_{\text{охл}} = 4 \cdot d_{\text{тр.э.}} \cdot D_1 \cdot \omega, \quad (2.17)$$

$$F_{\text{охл}} = 4 \cdot d_{\text{тр.э.}} \cdot D_1 \cdot \omega = 4 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 10^{-2} \cdot 28 = 0,874 \text{ м}^2.$$

Оскільки $P_{\text{отв}} > P_{\text{охл}}$ прийняті параметри водяного охолодження задовольняють усі умови, і перерахунку робити не потрібно.

Приймаємо, що індуктор охолоджується водою з магістралі, і знаходимо перепад тисків води на вході і виході індуктора:

$$\Delta p = \left(\lambda_{\text{тр}} k_{\text{ш}} \frac{\pi D_1}{d_{\text{тр.э}}} + \xi_{\text{пов}} \right) \omega \frac{\rho \omega^2}{2}, \quad (2.18)$$

де $\lambda_{\text{тр}} = 0,316 / \sqrt[4]{\text{Re}}$ - коефіцієнт тертя;

$k_{\text{ш}}$ - коефіцієнт, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубки ($k_{\text{ш}} = 1,8 - 2,5$);

$\xi_{\text{пов}}$ - коефіцієнт опору повороту (табл. 6, Додаток А).

Якщо $\Delta p > 202,6 \text{ кН/м}^2$, то слід збільшити число секцій охолодження.

$$\Delta p = \left(0,021 \cdot 2,1 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,3}{2,6 \cdot 10^{-2}} + 0,1485 \right) \cdot 28 \cdot \frac{1 \cdot 1,5^2}{2} = 55,008 \text{ кН/м}^2.$$

Висновок: знайдене значення Δp не перевищує критичну величину значення ($202,6 \text{ кН/м}^2$). Отже, число секцій охолодження було прийняте правильно.

2.2 Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання для розрахунку установки індукційного нагріву наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Індивідуальні завдання для розрахунку установки індукційного нагріву

№ з/п	t	D ₂	a ₂	Δt
	°C	мм	мм	°C
1	1000	150	350	160
2	1050	200	350	100
3	1100	150	350	140
4	1150	200	450	160
5	1200	150	500	140
6	1250	150	350	160
7	1300	200	350	100
8	1350	150	350	140
9	1400	200	450	160
10	1000	150	500	150
11	1050	150	350	160
12	1100	200	350	100
13	1150	150	350	140
14	1200	200	450	160
15	1250	150	500	140
16	1300	150	350	160
17	1350	200	350	100
18	1400	150	350	140
19	1000	200	450	160
20	1050	150	500	150

3 Розрахунок теплового вузла печі вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського

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 частини нагрівача. Верхня частина теплового вузла ізолюється графітовими екранами.

3.1 Задача №3

Зробити розрахунок теплового вузла печі для вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського.

Умови задачі

Прийmemo наступні початкові дані для розрахунку:

- 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.

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

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

$$Q_1 = \frac{\left(\frac{T_{\text{нагр}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{кор}}}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_{\text{н.-экр}}} + \frac{(n-1)}{C_{\text{эер.-экр}} \cdot F_{\text{ср.экр.}}} + \frac{1}{C_{\text{экр.корп}} \cdot F_{\text{кар.экр.}}}}, \quad (3.1)$$

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

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

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

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

$$C_{\text{н.экр}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{\text{нагр.}}} + \frac{F_{\text{нар.нагр.}}}{F_{\text{вн.экр.}}} \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{экр.}}} - 1 \right)}, \quad (3.2)$$

де C_s – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, ($C_s = 4,9$ ккал/м²·год·К [6]);

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

$\epsilon_{\text{экр}}$ – міра чорноти вуглеграфітової тканини, ($\epsilon_{\text{нагр}} = 0,87$ [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, ($D_{\text{н.нагр}} = 0,4$ м);

l – висота частини нагрівача, що гріє, ($l = 0,36$ 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, ($D_{\text{вн.экр}} = 0,45$ м);

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

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

Приведений коефіцієнт випромінювання системи екран-екран дорівнює:

$$C_{\text{екр.екр}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{e_{\text{экр.}}} + \frac{F_{\text{вн.экр.}}}{F_{\text{нар.экр.}}} \left(\frac{1}{e_{\text{экр.}}} - 1 \right)}, \quad (3.3)$$

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 ($D_{\text{нар.екр}} = 0,49 \text{ м}$).

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

Приведений коефіцієнт випромінювання системи екран-корпус печі дорівнює:

$$C_{\text{екр.кор}} = C_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{e_{\text{экр.}}} + \frac{F_{\text{нар.экр.}}}{F_{\text{корп.}}} \left(\frac{1}{e_{\text{корп.}}} - 1 \right)}, \quad (3.4)$$

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 сталевий стінки печі ($\varepsilon_{\text{екр}} = 0,8$ [8]).

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

Середня площа екранів:

$$F_{\text{ср.екр.}} = \frac{F_{\text{вн.екр.}} + F_{\text{нар.екр.}}}{2} = \frac{0,763 + 0,83}{2} = 0,796 \text{ м}^2, \quad (3.5)$$

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

2. Тепловтрати з нижнього торця нагрівача.

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

$$Q_2 = \frac{C_{\text{пр}} \cdot F_{\text{т}} \left[\left(\frac{T_{\text{н.т.}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100}\right)^4 \right]}{n+1}, \quad (3.6)$$

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

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

$F_{\text{т}}$ – площа поверхні торцевих екранів.

$$F_{\text{т}} = \frac{p}{4} (D_{\text{в.бок.}}^2 - d_{\text{ш}}^2) = \frac{3,14}{4} (0,45^2 - 0,07^2) = 0,155 \text{ м}^2 \quad (3.7)$$

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:

$$Q_3 = \frac{C_{\text{пр}} \cdot F_{\text{тор}} \cdot f \left[\left(\frac{T_{\text{н.э.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{n + 1}, \quad (3.8)$$

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.

$$F_{\text{тор}} = \frac{p}{4} (D_{\text{н.э.}}^2 - d_{\text{в.н.}}^2) = \frac{3,14}{4} (0,49^2 - 0,37^2) = 0,08 \text{ м}^2, \quad (3.9)$$

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 кремнію:

$$Q_4 = C_{\text{пр.}} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.10)$$

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

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

де ε_p – міра чорноти розплаву кремнію, ($\varepsilon_p = 0,46$ [3]);

F – площа поверхні розплаву, (при D тигля 330 мм, $F=0,085 \text{ м}^2$);

T_p – температура розплаву, ($T_p = 1723 \text{ К}$);

$T_{\text{окр}}$ – температура стінки камери, ($T_{\text{окр}} = 313 \text{ К}$).

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

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

$$Q_5 = \lambda \cdot F_T \cdot (t_1 - t_2) \cdot m \cdot l, \quad (3.11)$$

де λ – теплопровідність графіту [2] ($\lambda = 100 \text{ ккал/м} \cdot \text{год} \cdot \text{°C}$).

$$F_T = \frac{\rho(d_1^2 - d_2^2)}{4} = \frac{3,14(0,06^2 - 0,03^2)}{4} = 0,002 \text{ м}^2, \quad (3.12)$$

де d_1 – зовнішній діаметр труби ($d_1 = 0,06 \text{ м}$);

d_2 – внутрішній діаметр труби ($d_2 = 0,03 \text{ м}$);

m – теплова характеристика труби [5].

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot u}{\lambda \cdot F_T}} = \sqrt{\frac{80 \cdot 0,19}{100 \cdot 0,002}} = 8,7, \quad (3.13)$$

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

u – зовнішній периметр труби ($u=0,19 \text{ м}$);

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

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

6. Втрати тепла по струмопроводящих «лапах» нагрівача.

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

$$Q_6 = 2 \cdot \frac{\lambda \cdot F}{l} (t_n - t_k) + 0,86 \cdot 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot \frac{I^2}{2}, \quad (3.14)$$

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_n – температура нагрівача в місці контакту з «лапою», ($t_n = 1500$ °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:

$$Q_7 = C_v \cdot V \cdot \Delta t, \quad (3.15)$$

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

$$Q_8 = \frac{m}{\phi} (r + C_p \cdot \Delta t), \quad (3.16)$$

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 кремнію, ($C_p = 0,181$ 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.

$$Q_9 = \frac{m}{\phi} \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (3.17)$$

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, $m = 12 + 4,63 + 1,32 = 17,95$ 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:

$$P = \frac{Q \cdot k}{860}, \quad (3.18)$$

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

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

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

3.2 Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання для розрахунку теплового вузла печі для вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Індивідуальні завдання для розрахунку теплового вузла печі

№	Д _{н.нагр}	Д _{тигля}	М	Т _{нагр.}	Т _{кор.}
	мм	мм	кг	°С	°С
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

ТЕМИ САМОСТІЙНИХ РОБІТ

1. Конструктивний розрахунок рафінуючих печей, що нахилиються.
2. Конструктивний розрахунок відбивних плавильних паливних печей.
3. Конструктивний розрахунок двокамерної відбивної печі.
4. Конструктивний розрахунок полум'яних нагрівальних печей.
5. Конструктивний розрахунок шахтних печей.
6. Конструктивний розрахунок трубчастих обертових печей.
7. Конструктивний розрахунок печей киплячого шару.
8. Конструктивний розрахунок нагрівальних електричних печей опору.
9. Конструктивний розрахунок плавильних електричних печей опору.
10. Конструктивний розрахунок дугових руднотермічних печей.
11. Конструктивний розрахунок дугових вакуумних печей.
12. Конструктивний розрахунок електронно-променевих печей.
13. Конструктивний розрахунок агрегатів хлорування.
14. Конструктивний розрахунок апаратів ректифікаційного очищення.
15. Конструктивний розрахунок апаратів відновлення.

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 1 - Коефіцієнт F для визначення нижньої межі частоти при нагріві сталевих заготівок 48

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 2 - Поправочний коефіцієнт k_M для визначення коефіцієнта взаємної індукції 49

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 3 - значення поправочного коефіцієнта k для обчислення коефіцієнта самоіндукції 50

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 A і B 51

$D_1/(V\sqrt{2}\Delta_K)$	A	B	$D_1/(V\sqrt{2}\Delta_K)$	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 5 - Фізичні параметри води 52

t, C	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$\alpha, \text{м}^2/\text{с}$	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 6 - Коефіцієнт місцевого опору при повороті струменя на 360° 53

$D_{\text{тр.э}}$	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 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 2 - Додаткові одиниці СІ

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

Таблиця 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
	хвилинка	'	'	1' = π/108·10 ⁻² = 2,91·10 ⁻⁴ рад
	секунда	''	''	1'' = π/648·10 ⁻³ = 4,85·10 ⁻⁶ рад

Подовження табл. 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	еВ	eV	$1 \text{ еВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
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 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	–	s^{-1}
Рівень інтенсивності звуку, звукового тиску	бел, децибел	Б, дБ	B, dB	1	1
Сила, вага	ньютон	Н	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Тиск, механічне напруження, модуль пружності	паскаль	Па	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж	J	Н·м	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Потужність, потік енергії	ват	Вт	W	Дж/с	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Електричний заряд	кулон	Кл	C	А·с	А·с
Електрична напруга, електричний потенціал, електрорушійна сила	вольт	В	V	Вт/А	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	фарада	Ф	F	Кл/В	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Електричний опір	ом	Ом	Ω	В/А	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	сименс	См	S	Ом ⁻¹	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Магнітний потік, потік магнітної індукції	вебер	Вб	Wb	В·с	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція, густина магнітного потоку	тесла	Тл	T	Вб/м ²	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	генрі	Гн	H	Вб/А	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
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	s^{-1}	s^{-1}
Поглинена доза	грей	Гр	Gy	Дж/кг	$m^2 \cdot s^{-2}$
Еквівалентна доза	зиверт	Зв	Sv	Дж/кг	$m^2 \cdot s^{-2}$

Додаток Г

Одиниці вимірювання і розмірності основних величин у системі СІ

Таблиця 1 - Співвідношення між значеннями температури в різних шкалах

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

Таблиця 2 - Співвідношення між одиницями (градусами) різних шкал

Одиниця	К	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{F}$	$^\circ\text{Rank}$	$^\circ\text{R}$
Кельвін, К	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