

Практичне заняття № 5

РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Розрахунок установки індукційного нагрівання 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 затисках індуктора.

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

Приклад 1. Розрахувати індукційну установку для нагрівання металевих заготовок перед пресом. Діаметр заготовки $D_2 = 150$ мм, а довжина $a_2 = 400$ мм. Температура нагріву $t_{\text{пов}}^{\text{коп}} = 1100$ °С, допустимий перепад температур по перерізу деталі $\Delta t = 150$ °С.

Розв'язання

Тепловий розрахунок режиму нагрівання

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

$$f \geq \frac{F}{D_2^2}, \quad (1)$$

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.А.1 Додаток А, ($F = 7,963$).

«Гаряча» глибина проникнення струму в метал:

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

Оскільки набуто значення $\Delta_{\kappa} < 0,2 \cdot D_2$ ($0,027 < 0,03$), то глибина активного шару дорівнює $\varepsilon = \Delta_{\kappa}$, і розрахунковий діаметр заготівки:

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

Час нагріву однієї заготівки знаходимо за формулою:

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

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 заготівки:

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

де γ - густина матеріалу заготівки, 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:

$$P_{\tau} = \frac{G \cdot \bar{c} \cdot \bar{t}}{\tau_{\kappa}}, \quad (3)$$

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

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

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

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:

$$\alpha = \frac{k_m^2}{k_2^2 + A^2}; \quad (4)$$

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

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

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

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

Приведені спротиви заготовки

Активний опір, визначаємо за формулою:

$$r_2' = a \cdot \pi \cdot \rho_2 \cdot \frac{A \cdot D_2^2}{2 \cdot a_2 \cdot \Delta_k^2}, \quad (5)$$

де ρ_2 – питомий опір матеріалу заготовки, 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:

$$x_2' = 2ak_2(1 - B) \cdot \pi \cdot f \frac{\pi^2 D_2^2}{a_2^2} \cdot 10^{-7}, \quad (6)$$

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

Опір індуктора

Омічний опір визначаємо за формулою:

$$r_{\text{III}} = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot D_1'}{a_1 \cdot \delta_1 \cdot g}, \quad (7)$$

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

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

Активний опір:

$$r_1 = k_r \cdot r_{\text{III}}, \quad (8)$$

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

Реактивний опір:

$$x_1 = k_r \left[2\pi f \frac{\pi^2 \cdot D_1^2}{a_1^2} \cdot 10^{-7} + k_x r_{\text{III}} \right], \quad (9)$$

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

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:

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

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

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:

$$U_{\text{и}}' = z_{\text{э}} \cdot I_{\text{и}}', \quad (10)$$

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

Потужність, підведена до індуктора:

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

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 $\Delta_{\text{из}} = 1,1 \text{ мм.}$

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:

$$r_{\text{э}} = \omega^2 \cdot (r_1 + r_2'),$$

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

$$x_{\text{э}} = \omega^2 \cdot (x_1 + x_2'),$$

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

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

Сила струму в багатовитковому індукторі:

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

Активна потужність установки:

$$P_{\text{а}} = I_{\text{н}}^2 \cdot r_{\text{э}} \cdot 10^{-3},$$

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

Втрати на індукторі:

$$P_{\text{на}} = P_{\text{а}} - P_{\Sigma},$$

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

Реактивна потужність установки:

$$P_p = I_n^2 \cdot x_{\text{э}} \cdot 10^{-3},$$

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

Місткість конденсаторної батареї, необхідна для компенсації реактивної потужності:

$$C = \frac{P_p \cdot 10^9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\text{и}}^2}, \quad (11)$$

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

Розрахунок охолодження індуктора

Повна потужність, що відводиться водою, що охолоджує:

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

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

Необхідна кількість води:

$$G_{\text{охл}} = \frac{P_{\text{охл}} \cdot 10^{-3}}{c_B \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})}, \quad (12)$$

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

Оскільки швидкість води не повинна перевищувати $\omega_B = 1,5 \text{ м/с}$,

знайдемо необхідну площу перерізу трубки індуктора, вважаючи, що число секцій дорівнює $n = 1$:

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

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. А.5, Додаток А).

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_B \cdot d_{\text{тр.э.}}}{\nu_B}, \quad (13)$$

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:

$$Nu = 0,023 \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{d_{\text{тр.э.}}}{D_1 + d_{\text{тр.э.}}} \right) \cdot Pr_B^{0,43} \cdot Re_B^{0,8}, \quad (14)$$

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

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією:

$$\alpha^{\text{конв}} = Nu \cdot \frac{\lambda_B}{d_{\text{тр.э.}}}, \quad (15)$$

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

Кількість тепла, що фактично відводиться водою:

$$P_{\text{отв}} = a_{\text{конв}} F_{\text{охл}} (t_{\text{ц}} - t_{\text{в}}) \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

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

$$F_{\text{охл}} = 4 \cdot d_{\text{тр.э.}} \cdot D_1 \cdot \omega, \quad (17)$$

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

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:

$$\Delta p = \left(\lambda_{\text{тр}} k_{\text{ш}} \frac{\pi D_1}{d_{\text{тр.э.}}} + \xi_{\text{пов}} \right) \omega \frac{\rho \omega^2}{2}, \quad (18)$$

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

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

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

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

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

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

Завдання для самостійної роботи

Завдання 1. Розрахувати індукційну установку для нагрівання металевих заготовок перед пресом. Діаметр заготовки D_2 (м), а довжина a_2 (мм). Температура нагріву $t_{\text{пов}}^{\text{кон}}$ ($^{\circ}\text{C}$), допустимий перепад температур по перерізу деталі Δt ($^{\circ}\text{C}$).

Індивідуальні завдання для розрахунку установки індукційного нагрівання наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Індивідуальні завдання для розрахунку установки індукційного нагрівання

№ варіанта	t , $^{\circ}\text{C}$	D_2 , мм	a_2 , мм	Δt , $^{\circ}\text{C}$
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

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

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$a, \text{м}^2/\text{с}$	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
	хвилинка	'	'	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