

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства  
та природокористування

Кафедра технології будівельних виробів  
і матеріалознавства

**03-09-133М**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
**«Теплові процеси та установки підприємств бетонних та  
залізобетонних виробів»**

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня  
за освітньо-професійною програмою «Технології будівельних  
конструкцій, виробів і матеріалів»  
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
всіх форм навчання

Рекомендовано  
науково-методичною радою  
з якості ННІБА  
Протокол № 2 від 05.11.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теплові процеси та установки підприємств бетонних та залізобетонних виробів» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Бордюженко О. М. – Рівне : НУВГП, 2024 – 31 с.

**Укладач:** Бордюженко О. М., к.т.н, доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства.

**Відповідальний за випуск:** Дворкін Л. Й., проф., д.т.н., завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства.

**Керівник групи забезпечення ОП:** Дворкін Л. Й.

## Зміст

Передмова .....	4
Лабораторна робота №1. Теплофізичні характеристики тепловологісної обробки бетону .....	5
Лабораторна робота №2. Температурні перепади в бетонних виробах при тепловій обробці .....	12
Лабораторна робота №3. Процеси масообміну при тепловій обробці бетону .....	17
Лабораторна робота №4. Тепловий баланс лабораторної пропарювальної камери .....	22
Додатки.....	28
Література .....	31

## ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки мають за мету надати студентам основи методики проведення лабораторних робіт, які стосуються вивчення процесів та встановлення теплофізичних характеристик в процесі теплової обробки бетону і залізобетону. Лабораторні роботи є продовженням теоретичного курсу і повинні закріплювати набуті знання шляхом ознайомлення з конструкцією теплової установки, її роботою а також практичним визначенням теплотехнічних характеристик, проведенням необхідних розрахунків і формулюванням висновків.

Зміст та обсяг лабораторних робіт повністю відповідають силабусу навчальної дисципліни "Теплові процеси та установки підприємств бетонних та залізобетонних виробів".

Перед початком лабораторних досліджень ретельно готуються всі необхідні компоненти. Складається детальний план проведення експерименту, в якому чітко визначена послідовність дій. Вибираються та встановлюються відповідні вимірювальні прилади, які попередньо перевіряються на працездатність. Важливо пам'ятати, що будь-які похибки вимірювань можуть вплинути на точність отриманих результатів, тому їх необхідно враховувати під час обробки даних.

Паралельно з проведенням експерименту необхідно здійснювати постійний контроль над отриманими даними. Це дозволяє своєчасно виявити та усунути помилки, пов'язані з неточністю вимірювальних приладів або іншими факторами. Результати вимірювань слід фіксувати в журналі в точно визначений час або за сигналом. Перед початком роботи студенти повинні детально вивчити обладнання та ознайомитися з правилами техніки безпеки.

Оцінювання лабораторних робіт проводиться відповідно до силабусу даної дисципліни за такими модулями:

- вхідний контроль знань. Проводиться, як правило в тестовій формі і передбачає теоретичних знань по темі лабораторної роботи;
- безпосередня участь у проведенні необхідних вимірювань і розрахунків в процесі лабораторної роботи, оформлення звіту;
- підсумковий контроль знань. Передбачає захист звіту лабораторної роботи (як правило, в усній формі).

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОНУ

**Мета:** Вивчити теплофізичні характеристики процесу тепловологісної обробки бетону.

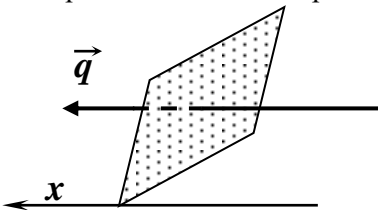
**Обладнання і матеріали:** зразок бетону, камера теплової обробки, термопари, реєструючий прилад, ваги.

### Загальні відомості

В загальному випадку передача тепла (теплообмін) під час теплової обробки бетону може здійснюватись конвективно з використанням в якості теплоносія водяної пари, повітря, пароповітряної суміші, кондуктивно (в результаті теплопровідності) а також за рахунок випромінювання (радіації).

Розрізняють стаціонарні  $t = f(x; y; z)$  і нестаціонарні  $t = f(x; y; z; \tau)$  температурні поля, а також три-, дво- і одномірні.

Прикладом одномірного температурного поля є поле необмеженої (нескінченної) пластини\*. Для спрощеного аналізу теплових процесів в даній роботі застосовується модель необмеженої пластини. У такої пластини тепло- і масообмін може здійснюватись лише вздовж однієї



осі по двом граням.

Кількість тепла  $Q$ , що буде передаватись від більш нагрітої ізотермічної поверхні цієї пластини з температурою  $t_1$  до менш нагрітої з температурою  $t_2$  через площу  $S$  за час  $\tau$  можна визначити за формулою

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot S \cdot \tau,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\delta$  – товщина.

(1.1)

---

\* "Необмежена пластини" – ширина і довжина такої пластини є необмежено великими у порівнянні із товщиною.

Звідси коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  чисельно рівний кількості теплоти, що проходить за одиницю часу, через одиницю площі пластини з даного матеріалу товщиною в одиницю довжини, при різниці температур в  $1^\circ\text{C}$  [ $\text{Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ ].

Кількість теплоти, що проходить через одиницю поверхні за одиницю часу називається тепловим потоком, [ $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}$ ]:

$$q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} . \quad (1.2)$$

При розташування ізотерм на деякій відстані  $\Delta n$  по нормалі одна від одної:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta n} , \quad (1.3)$$

або приймаючи, що  $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right| = \frac{\partial t}{\partial n} = \nabla t$ ,

можна отримати математичний вираз закону Фур'є, що виражає величину питомого теплового потоку (або густини теплового потоку) через будь-яку ізотермічну поверхню:

$$q = -\lambda \cdot \nabla t . \quad (1.4)$$

Оскільки  $\nabla t$  є векторною величиною, то знак “-” вказує на те, що тепло розповсюджується в сторону зниження температури, а отже приріст температури  $\Delta t$  в цьому напрямку є від'ємним.

В повсякденній практиці температурним градієнтом часто називають відношення  $\frac{\Delta t}{\Delta n}$ , приймаючи за величину  $\Delta n$  достатньо малу величину.

*Нестаціонарні теплові процеси* спостерігаються при ТО виробів в період їх нагріву або охолодження. При цьому важливе значення має інша теплова константа матеріалу – *коефіцієнт температуропровідності*:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} , [\text{м}^2/\text{с}] . \quad (1.5)$$

Цей коефіцієнт характеризує швидкість з якою тіло здатне підвищувати свою температуру під дією тепла, що надходить. Також він характеризує швидкість вирівнювання температури окремих точок тіла під дією початкових температурних градієнтів.

Коефіцієнти  $\lambda$  і  $a$  дають повну характеристику теплофізичних властивостей матеріалу.

При безпосередньому контакті теплоносія з твердим тілом (матеріалом) передача йому теплоти здійснюється шляхом теплопровідності і конвекції. Спільна передача тепла теплопровідністю і конвекцією називається *конвективним теплообміном*.

*Коефіцієнт зовнішнього теплообміну* або *тепловіддачі* конвекцією характеризує інтенсивність теплообміну між фазами і значною мірою залежить від умов теплообміну, в першу чергу від швидкості та характеру руху теплоносія, характерних розмірів тіла та характеру його поверхні.

Коефіцієнт теплообміну  $\alpha$  [Вт/м<sup>2</sup>·°C] можна розрахувати із формули Ньютона:

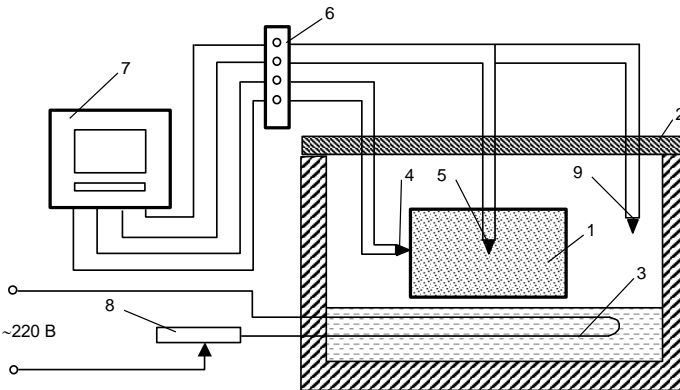
$$Q = \alpha \cdot S(t_c - t_m) \cdot \tau, \quad (1.6)$$

де  $t_c$  і  $t_m$  – відповідно температура середовища і матеріалу.

Виражаючи через густину теплового потоку:

$$\alpha = \frac{q}{t_c - t_m}. \quad (1.7)$$

### Опис дослідної установки



**Рис. 1.1.** Схема дослідної установки

- 1 – дослідний зразок; 2 – лабораторна пропарювальна камера;
- 3 – нагрівальний елемент; 4, 5, 9 – термопари; 6 – термостат холодних спаїв; 7 – прилад для вимірювання та реєстрації температури; 8 – реостат

Зразок у вигляді "нескінченої" пластини з вміщеними мідь-константовими термопарами\* 4 і 5 встановлений у лабораторній пропарювальній камері (рис. 1.1). Термопара 4 вміщена в центрі зразка, а термопара 5 розміщена на поверхні виробу. Температура середовища в камері контролюється термопарою 9. Для створення теплового потоку використовується нагрівальний елемент 3 з можливістю регулювання реостатом 8.

### **Порядок виконання роботи**

1. Підготовлений зразок з рівномірною швидкістю нагрівають в лабораторній установці до заданої температури (80...90°C). Швидкість нагріву рекомендується витримувати близько 1°C/хв.

2. В процесі нагріву через проміжки часу (2...5 хв.) знімаємо значення температури середовища  $t_c$ , на поверхні  $t_n$  і в центрі виробу  $t_{ц}$  за допомогою потенціометра або іншого реєструючого приладу та записуємо в табл.1.1.

Таблиця 1.1

Дослідні дані

$\tau$ , хв.	0	5	10	15	20	25	30	...
$t_c$ , °C								
$t_n$ , °C								
$t_{ц}$ , °C								

### **Обробка результатів**

1. За отриманими значеннями табл. 1.1 в системі координат  $t = f(\tau)$ , будуються криві залежностей  $t_c = f(\tau)$ ;  $t_n = f(\tau)$ ;  $t_{ц} = f(\tau)$ .

2. Графічне поле залежностей розбивається на ділянки таким чином, щоб лінія  $t_n = f(\tau)$  була близькою до прямої лінії, а температурний інтервал  $t_{n\tau} - t_{n0}$  не перевищував 15...25 °C. На ділянках де зміна температури  $\theta = t_n - t_c$  відбувається різко, температурний інтервал ділянки скорочують.

---

\* Короткі теоретичні відомості про термопари наведено в додатку 1.



Графічні залежності будують за прикладом, зображеним на рис. 1.2.

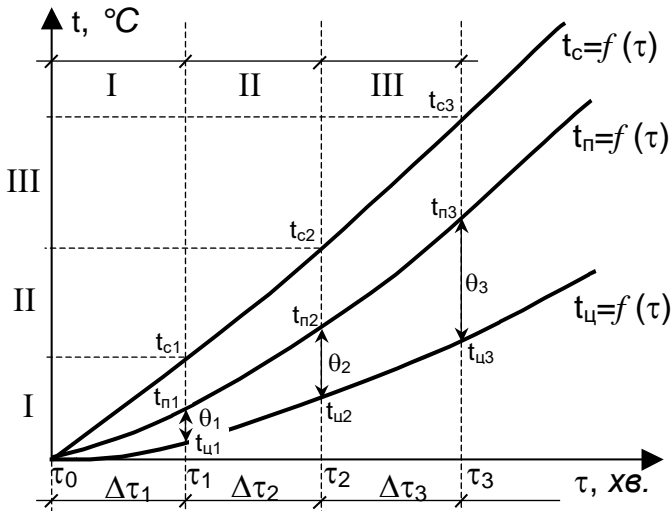


Рис. 1.2. Приклад побудови залежностей  $t_c = f(\tau)$ ;  $t_n = f(\tau)$ ;  $t_u = f(\tau)$

3. Для кожної ділянки визначаємо (всі показники знімаються з побудованих кривих):

1) швидкість зміни температури поверхні або швидкість нагріву,  $^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ :

$$\text{для ділянок I і II: } b_I = \frac{t_{n1} - t_{no}}{\Delta\tau_1}; \quad b_{II} = \frac{t_{n2} - t_{n1}}{\Delta\tau_2} \text{ і т.д.,}$$

де  $t_{no}$ ,  $t_{ni}$  – температура поверхні на початку і в кінці ділянки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\tau_n$  – тривалість процесу на розрахунковій ділянці, хв.

2) різницю температур по перерізу зразка на границях ділянок,  $^{\circ}\text{C}$ :  $\theta_0 = t_{no} - t_{uo}$ ;  $\theta_1 = t_{n1} - t_{u1}$  і т.д.

3) середня температура по перерізу зразка на границях ділянок,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_o^{\text{cp}} = t_{no} - 0.637 \cdot \theta_0; \quad t_1^{\text{cp}} = t_{n1} - 0.637 \cdot \theta_1 \text{ і т.д.}$$

4) середня температура перерізу зразка на ділянці,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_1^{\text{cp}} = \frac{t_o^{\text{cp}} + t_1^{\text{cp}}}{2}; \quad t_{\text{II}}^{\text{cp}} = \frac{t_1^{\text{cp}} + t_2^{\text{cp}}}{2} \text{ і т.д.}$$

$$5) \text{ критерії: } \frac{\theta_o}{b_1 \cdot \tau_1}; \quad \frac{\theta_1}{b_1 \cdot \tau_1} \text{ і т.д.,}$$

відповідно до графіка (див. рис. 1.3), залежно від значень критеріїв знаходимо критерії Фур'є ( $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ ):

$$Fo^I = f\left(\frac{\theta_o}{b_1 \cdot \tau_1}; \frac{\theta_1}{b_1 \cdot \tau_1}\right); \quad Fo^{II} = f\left(\frac{\theta_1}{b_2 \cdot \tau_2}; \frac{\theta_2}{b_2 \cdot \tau_2}\right) \text{ і т.д.}$$

$$6) \text{ коефіцієнти теплопровідності з виразу: } a = \frac{Fo \cdot R^2}{\tau},$$

[м<sup>2</sup>/год],

де R – відстань, (м) між термопарами 4 і 5 (див. рис. 1.1).

$$\text{Відповідно для ділянок: } a_I = \frac{Fo^I \cdot R^2}{\Delta\tau_I}; \quad a_{II} = \frac{Fo^{II} \cdot R^2}{\Delta\tau_{II}} \text{ і т.д.}$$

Результати розрахунку коефіцієнтів теплопровідності заносимо в табл.1.2.

4. Якщо відома теплоємність  $c$  [кДж/(кг·°C)] досліджуваного зразка матеріалу (бетону) і його середня густина  $\rho_o$  [кг/м<sup>3</sup>], то значення *коефіцієнту теплопровідності* досліджуваного матеріалу  $\lambda$  [Вт/(м·°C)] в розрахункових ділянках буде становити :

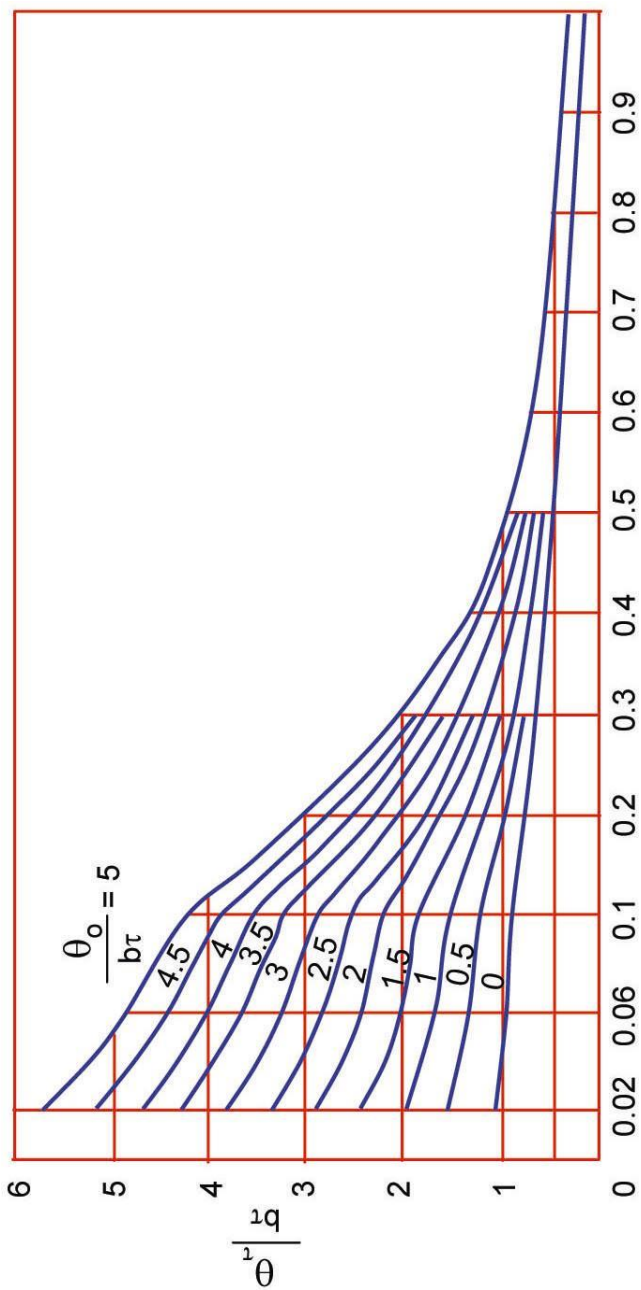
$$\lambda_I = 3.6 \cdot a_I \cdot c \cdot \rho_o; \quad \lambda_{II} = 3.6 \cdot a_{II} \cdot c \cdot \rho_o \text{ і т.д.}$$

Результати розрахунку коефіцієнтів теплопровідності також записуються в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Результати розрахунку теплофізичних характеристик матеріалу

№ ділянки	I	II	...	n
$t^{\text{cp}}, \text{°C}$				
$a, \text{м}^2/\text{°C}$				
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$				



**Рис. 1.3.** Графік залежності критеріїв подібності

5. Орієнтовна кількість тепла [кДж], що затрачена на нагрів зразка від  $t_o^{cp}$  до  $t_n^{cp}$ :

$$Q = c \cdot m \cdot (t_n^{cp} - t_o^{cp}),$$

де  $m$  – маса зразка досліджуваного матеріалу, кг до початку ТО.

6. В висновках до роботи наводять обґрунтування отриманих результатів та порівняння їх з довідковими даними.

### Контрольні питання

1. Перерахувати та дати визначення теплофізичних величин, які характеризують процес теплообміну.
2. Перерахувати основні теплофізичні характеристики, які визначають процес масообміну в процесі тепловологісної обробки.
3. Описати процеси зовнішнього тепло- і масообміну.
4. Описати процеси внутрішнього тепло- і масообміну.
5. Напружений стан при тепловологісній обробці.

### Лабораторна робота №2

## **ТЕМПЕРАТУРНІ ПЕРЕПАДИ В БЕТОННИХ ВИРОБАХ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ**

**Мета:** Дослідити кінетику зміни температури в окремих точках виробу та її розподіл в часі.

### Загальні відомості

Для знаходження розподілу температур у плоскій необмеженій пластині ( $b/h = 4 \dots 5$ ,  $l > b$  і  $l < h$  наприклад панелі), система координат розміщена в середині виробу. Так що вісь  $x$  перпендикулярна площині пластини. Для випадку, якщо виріб знаходиться у формі, випаровування йде з відкритої поверхні, а прогрів відбувається з двох сторін (термічним опором металевої форми можна нехтувати), диференціальне рівняння для цього випадку запишеться у вигляді:

$$\frac{\partial i(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 i(x, \tau)}{\partial \tau^2} + \frac{Q}{c\rho}, \quad (2.1)$$

де  $x$  – координати точки, м;  $\tau$  – час, с;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ :  $a = \lambda/(c \cdot \rho)$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\rho$  – густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – питома теплоємність  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $Q$  – теплота, яка виділяється при твердінні бетону,  $\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$ .

При числовому рішенні цього рівняння використовують критерії подібності Фур'є і Біо.

*Критерій Фур'є* характеризує швидкість зміни температури тіла при нестационарному режимі нагріву або охолодження:

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}, \quad (2.2)$$

де  $R$  – характерний розмір, м.

*Критерій Біо* зв'язує зовнішній теплообмін  $\alpha$  з теплопровідністю матеріалу  $\lambda_M$  і характерним для теплообміну розміром  $R$ :

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_M}, \quad (2.3)$$

де  $\lambda_M$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

При розрахунку температурного поля в матеріалі в довільній точці  $x$  використовують критеріальну залежність типу

$$\theta = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_{II}} = f(Fo; Bi; x/\ell), \quad (2.4)$$

де  $t_c$ ,  $t_{II}$  – температура середовища і початкова температура матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta$  – безрозмірна температура;  $t_x$  – температура в точці на відстані  $x$  від поверхні,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температура центру з усіх сторін прогрітого тіла  $t_{II}$  і його поверхні  $t_{II}$  визначають з допомогою графіків (рис. 2.1). Для цього за критеріями  $Fo$ , і  $Bi$  за графіком визначають відповідну безрозмірну температуру  $\theta$ . За нею по критеріальній залежності (2.4) визначають температуру в необхідній точці.

### Опис дослідної установки

Схема дослідної установки наведена на рис. 2.2. Виріб 3 відформовують у формі. При формуванні в нього закладаються термопари 5, які підключені до вимірювального комплексу 7. Виріб у формі, або без неї поміщають у пропарювальну камеру 1, де з

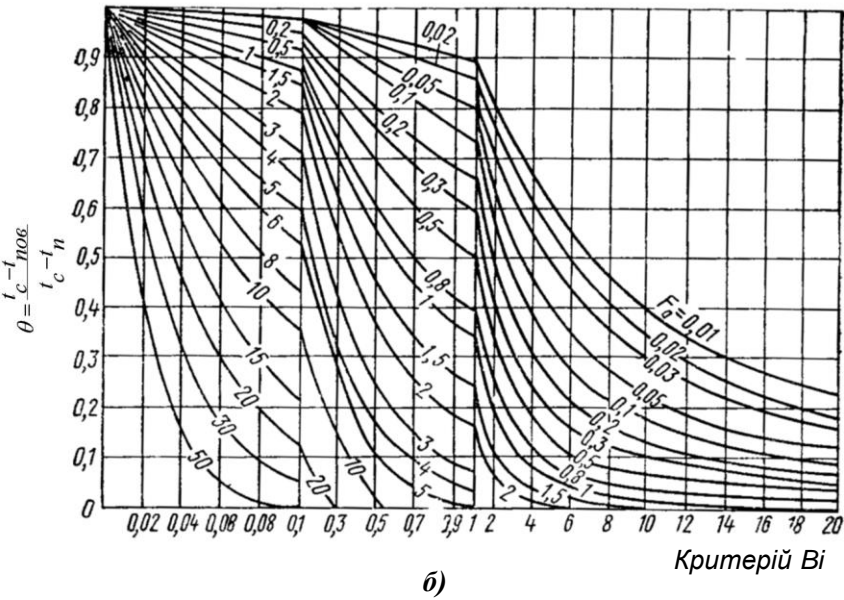
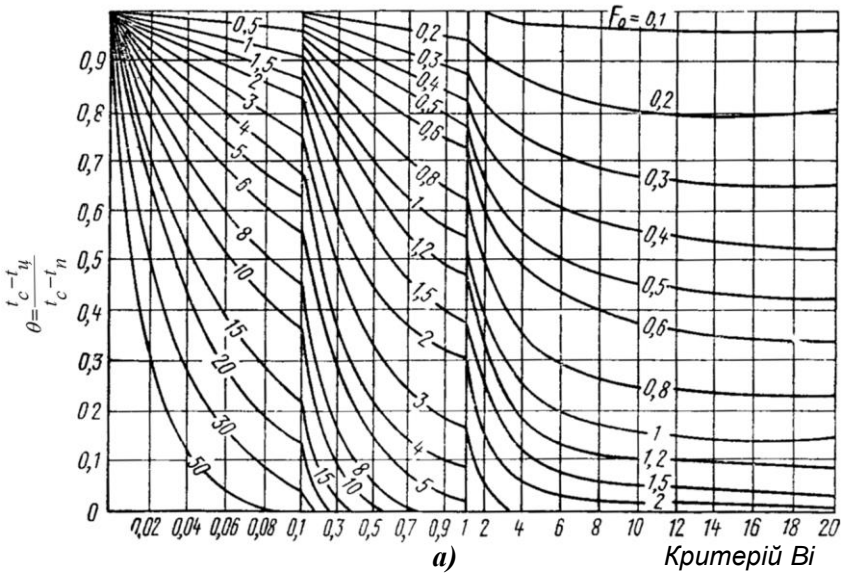
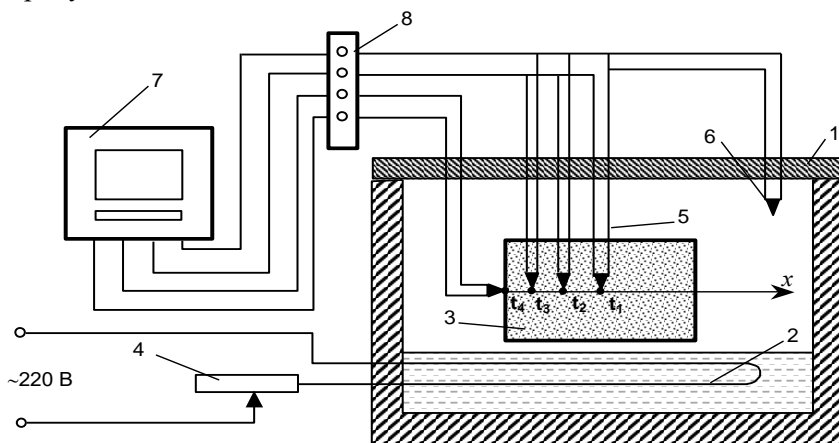


Рис. 2.1. Графіки для визначення безрозмірної температури в центрі (а) та на поверхні (б) виробу

допомогою нагрівача 2 створюється пароповітряне середовище. За допомогою термопари 6 вимірюється температура пароповітряного середовища  $t_c$  в камері. Температура поверхні виробу  $t_n$  ( $t_4$ ) та точок в середині виробу  $t_1$  ( $t_1$ ),  $t_2$ ,  $t_3$  вимірюються термопарами 5. При потребі можна вимірювати температуру поверхні виробу більше ніж в одній точці, а також збільшити кількість точок всередині виробу.



**Рис. 2.2.** Схема дослідної установки

- 1 – пропарювальна камера; 2 – нагрівальний елемент; 3 – виріб;  
 4 – реостат; 5, 6 – термопари; 7 – вимірювальний комплекс;  
 8 – термостат холодних спайів

### **Порядок виконання роботи**

1. Закласти у виріб та у камеру необхідні термопари.
2. Розмістити форму з виробом в пропарювальну камеру 1 та підключити вимірювальний комплекс 7.
3. Визначити початкові температури.
4. Включити нагрівальний елемент 2 і виконувати виміри температур через кожні 5...10 хв. до повної стабілізації заданої температури в камері. Швидкість нагріву рекомендується витримувати близько  $1^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ .
5. Отримані результати звести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

## Дослідні дані

$\tau$ , хв.	Температура, °С				
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_c$
0					
5					
10					
...					
60					

**Обробка результатів**

1. За даними табл. 2.1 побудувати діаграми залежності  $t = f(x)$  по поперечному перерізу виробу, в початковий та кінцевий момент прогріву та в 3...4 проміжних точках протягом даного періоду.

2. За формулами (2.2) та (2.3) розрахувати критерії подібності Фур'є і Біо для виробу через кожні 10 хв. після початку прогріву. При цьому необхідні значення  $a$ ,  $\lambda$  та  $\alpha$  знаходять експериментально (наприклад за допомогою лабораторної роботи №1) або використовуючи довідкові значення (додаток 4).

3. Використовуючи графіки (рис. 1) визначити безрозмірні температури  $\theta$  для тих же проміжків часу.

4. Знаходять температури центру та поверхні виробу з критеріальної залежності (2.4), підставляючи замість  $t_x$  відповідно  $t_{п}$  або  $t_{ц}$ . Всі розрахункові дані заносять в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

## Дослідні дані

$\tau$ , хв.	$t_c$	$F_0$	$B_i$	$\theta$	$t_{п}$ , °С	$t_{ц}$ , °С
0						
10						
20						
...						
60						

5. За даними табл. 2.2 побудувати графіки залежності  $t_{ц} = f(\tau)$  і  $t_{п} = f(\tau)$  за дослідний період в одній системі координат.

6. Провести аналіз отриманих результатів та записати висновок.



## Контрольні питання

1. Дати коротку характеристику зовнішнього і внутрішнього теплообміну при тепловій обробці.
2. Записати рівняння для процесу зовнішнього теплообміну.
3. Записати рівняння для процесу внутрішнього теплообміну.
4. Тепловиділення бетону при його тепловій обробці.
5. Зробити аналіз розподілення температури при прогріві виробів на різних стадіях теплової обробки.
6. Проаналізувати фактори, які впливають на розподілення температури у бетонному виробі.

## Лабораторна робота №3

### ПРОЦЕСИ МАСООБМІНУ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ БЕТОНУ

**Мета:** Дослідити процеси масообміну під час теплової (тепловологісної) обробки бетону.

#### Загальні відомості

Тепловологісна обробка бетону супроводжується процесами зовнішнього і внутрішнього тепло- та масообміну (конденсація пари на поверхні виробу, випаровування вологи з відкритої поверхні виробу, міграція вологи, пари і повітря в середині бетону і т.д.).

*Питомий потік маси* речовини згідно із законом Фіка визначається за формулою:

$$q' = -\lambda' \frac{\partial p'}{\partial n}, \quad (3.1)$$

де  $q'$  – густина потоку маси речовини,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  і  $\lambda'$  – коефіцієнт масопровідності,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ ;  $p'$  – парціальний тиск, Па;  $\partial p' / \partial n$  – градієнт тиску в напрямку переносу маси, Па/м.

*Коефіцієнт потенціалопровідності:*

$$a' = \frac{\lambda'}{c' \rho_B}, \quad (3.2)$$

де  $c'$  – питома масоємність вологого повітря при постійному

барометричному тискові і постійній ентропії, кг/(кг·Па);  $\rho_v$  - густина сухої частини вологого повітря, кг/м<sup>3</sup>.

*Коефіцієнт масопровідності:*

$$\lambda' = D \frac{\mu_{\text{п}} T}{R_{\mu} T_0^2} \left[ \frac{P_0}{B} \right], \quad (3.3)$$

де  $D$  – коефіцієнт потенціалопровідності для вологого газу або коефіцієнт дифузії при нормальних умовах, м<sup>2</sup>/с (для водяної пари при дифузії в повітрі  $D=2,194 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\mu_{\text{п}}$  – молекулярна маса водяної пари, кг/кмоль: (для водяної пари  $\mu_{\text{п}}=18$ );  $P_0$  і  $T_0$  – барометричний тиск і абсолютна температура при нормальних умовах;  $P_0 = 101325$  Па і  $T_0 = 273,15$  К;  $R_{\mu}$  – універсальна газова стала ( $R_{\mu} = 8314$  Дж/(кмоль·К));  $T$  – середня абсолютна температура граничного шару рівна:

$$T = 273,15 + (t_c + t_s)/2, \quad (3.4)$$

де  $t_c$  – температура середовища в камері, °С;  $t_s$  – температура поверхні матеріалу, °С;  $B$  – барометричний тиск повітря, Па.

*Кількість маси речовини, переданої в процесі випаровування конденсації:*

$$\begin{aligned} W_1 &= \alpha (P'_M - P'_c) S_1 \tau \\ W_x &= \beta (P'_0 - P'_s) S_k \tau_s \end{aligned} \quad (3.5)$$

де  $W_1$ ,  $W_x$  – відповідно кількість маси речовини, переданої при випаровуванні і конденсації, кг;  $S_1$ ,  $S_k$  - відповідно площі поверхонь випаровування і конденсації,  $P'_c$  – парціальний тиск водяної пари в середовищі камери, Па;  $P'_M$  – парціальний тиск водяної пари в середовищі камери біля поверхні виробу при температурі поверхні, рівній температурі мокрого термометра, Па;  $P'_s$  – парціальний тиск водяної пари при температурі поверхні виробу, Па;  $\alpha$  і  $\beta$  – відповідно коефіцієнти масообміну при випаровуванні і конденсації, кг/м<sup>2</sup>·с·Па).

*Критерій Нусельта* для процесу масообміну розраховують за формулою А.В.Нестеренка:

$$Nu' = 0.665(Pr' \cdot Ar)^{0.248} \text{ при } (Pr' \cdot Ar) = 1 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^8, \quad (3.6)$$

де  $Nu' = \alpha R / \lambda'$  – дифузійний критерій Нусельта;  $Pr' = \nu / D$  – дифузійний критерій Прандтля ( $Pr = 0,75$ ); критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{gl^3(\rho_c - \rho_s)}{v^2 \rho_c} \quad (3.7)$$

де  $g$  – прискорення земного тяжіння  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho_c$  – густина повітря у пароповітряній суміші в камері (табл. додаток. 2);  $\rho_s$  – густина повітря у пароповітряній суміші в середовищі камери біля поверхні виробу (табл. додаток 2),  $\text{кг/м}^3$ ;  $v$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості граничного шару,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $R$  – характерний розмір (сторона квадрату, еквівалентного за площею поверхні випаровування  $S$ , що розглядається):

$$R = \sqrt{S}. \quad (3.8)$$

*Коефіцієнт масообміну при випаровуванні:*

$$\alpha' = \frac{Nu' \cdot \lambda'}{R}. \quad (3.9)$$

### **Опис установки**

Установка (рис. 3.1) складається з пропарювальної камери 2 з нагрівальним елементом 3, у якій розміщено виріб у формі 1. Для визначення температури поверхні виробу та середовища в камері використовується вимірювальний прилад 4 з терморпарами 5 і 6. Для визначення зміни маси використовуються ваги 7 з шкалою 8 і зрівноважувальним вантажем 9.

### **Порядок виконання роботи**

1. Відформувати виріб у формі та закріпити на відкритій поверхні виробу терморпару 5.

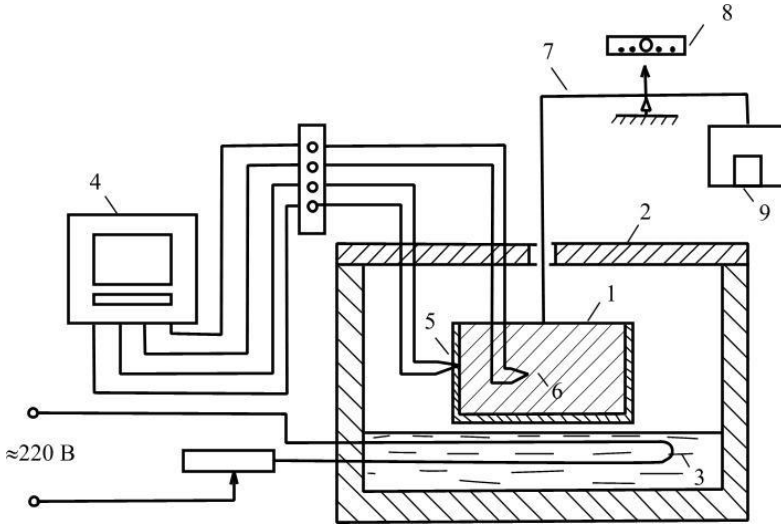
2. Виріб у формі 1 помістити на шальку ваг 7, закрити кришку пропарювальної камери з встановленою терморпарою 6.

3. Зрівноважити вантажем 9 ваги 7 таким чином, щоб стрілка важелів встановилась на позначці "0".

4. Записати барометричний тиск та температуру повітря навколишнього середовища.

5. Включити нагрівальний елемент 3. Проводити заміри температури поверхні виробу  $t_s$  і середовища  $t_c$  та знімати покази ваг через кожні 10...20 хв.

Отримані результати записати в табл. 3.1



**Рис. 3.1.** Схема установки

1 – зразок у формі; 2 – пропарювальна камера; 3 – нагрівальний елемент; 4 – вимірювальний прилад; 5, 6 – термопари; 7 – ваги; 8 – шкала ваг; 9 – зрівноважувальний вантаж

Таблиця 3.1

Дослідні дані

$\tau$ , хв.	Температура, °C		Покази ваг, г	Парціальний тиск водяної пари, Па
	поверхні, $t_s$	середовища, $t_c$		
0				
10				
20				
...				
60				

## **Обробка результатів**

1. За показами термометрів та таблицями додатку 1 визначити, парціальний тиск водяної пари  $P'$  та записати в табл. 3.1.

2. За даними таблиці 3.1 побудувати графіки зміни температури, зміни маси вологи, парціального тиску водяної пари в залежності від тривалості теплової обробки.

3. Прийняти втрати вологи  $G$  рівними найбільшому показу ваг.

4. Визначити втрати вологи за 1 годину з  $1 \text{ м}^2$  поверхні

$$W = \frac{G}{\tau \cdot S} . \quad (3.10)$$

5. Визначити середню абсолютну температуру граничного шару за формулою (3.4).

6. Коефіцієнт масопровідності знайти за формулою (3.3).

7. Знайти площу випаровування та характерний розмір  $R$  з (3.8).

8. Вирахувати критерій Архімеда (3.7) і Нусельта (3.6).

9. Визначити коефіцієнт масообміну за формулою (3.9).

10. Знайти кількість вологи  $W$ , якою обмінявся за 1 годину  $1 \text{ м}^2$  поверхні бетону з середовищем камери, за формулою (3.5).

11. Зробити аналіз отриманих результатів та записати висновок.

## **Контрольні питання**

1. Пояснити фізичні особливості внутрішнього та зовнішнього масообміну при тепловолігній обробці.
2. Пояснити аналогію між процесами масо- та теплообміну.
3. Сформулювати основні закони масообміну.
4. Описати напружений стан бетону і причини його утворення.
5. Описати напружений етап бетону при тепловій обробці розбавленими димовими газами.
6. Порівняти напружений стан, який виникає при тепловій обробці виробів розбавленими димовими газами та водяною парою.

## Лабораторна робота №4

### **ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЛАБОРАТОРНОЇ ПРОПАРЮВАЛЬНОЇ КАМЕРИ**

**Мета:** Складання теплового балансу пропарювальної камери.

#### **Загальні відомості**

В основу *матеріального балансу* покладено закон збереження маси. Згідно в цим законом маса матеріалу, яка завантажується в пропарювальну камеру  $\Sigma G_H$ , повинна бути рівною масі матеріалу, який вивантажується  $\Sigma G_B$ :

$$\Sigma G_H = \Sigma G_B. \quad (4.1)$$

В дійсності у теплових установках спостерігаються незворотні втрати маси (при транспортуванні, при видаленні вологи, при хімічних реакціях і т.д.), тому в матеріальному балансі необхідно врахувати втрати маси  $\Sigma G_{Bтр}$ . Тоді з загальному вигляді:

$$\Sigma G_H = \Sigma G_B + \Sigma G_{Bтр}. \quad (4.2)$$

В основі *теплового балансу* лежить закон збереження енергії. В теплову установку теплота надходить в кількості  $Q_M$  з матеріалом та в кількості  $Q_T$  з теплоносієм. З установки теплота виноситься в кількості  $Q'_M$  з матеріалом та в кількості  $Q'_T$  з відпрацьованим теплоносієм. В тепловій установці відбуваються втрати тепла  $Q_{Bтр}$  через огорожувальні конструкції та на їх нагрів, з теплоносієм через нещільності і т.д. В такому випадку тепловий баланс запишеться у вигляді:

$$Q_M + Q_T = Q'_M + Q'_T + Q_{Bтр}, \quad (4.3)$$

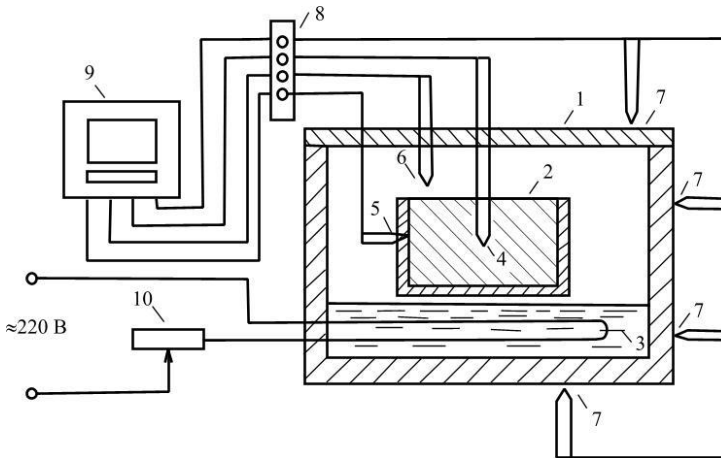
і в загальному вигляді

$$\Sigma Q_H = \Sigma Q_B + Q_{Bтр}, \quad (4.4)$$

де  $\Sigma Q_H$ ,  $\Sigma Q_B$ ,  $Q_{Bтр}$  – відповідно тепло, яке надходить, виноситься та втрачається в тепловій установці.

## Опис дослідної установки

Лабораторна пропарювальна камера (рис. 4.1) являє собою коробоподібний корпус 1. У нижній частині якого залито воду. З допомогою нагрівача 3 вода нагрівається до температури насичення та підтримується процес її випаровування. Камера зверху закрита кришкою з водяним затвором. Виріб 2 у формі встановлено на підставці в камері 1. При формуванні у виріб вводяться термопари 4 і 5 для фіксації температури в центрі та на поверхні виробу. Для вимірювання температури середовища в камері встановлено термопару 6. Температуру поверхні кришки, стінок вище та нижче рівня води і дна вимірюють з допомогою переносної термопари. Всі температури фіксуються приладом 9.



**Рис. 4.1.** Схема установки

- 1 – лабораторна пропарювальна камера; 2 – дослідний зразок у формі;  
3 – нагрівальний елемент; 4, 5, 6 – термопари; 7 – переносна термопара;  
8 – термостат холодних спаїв; 9 – прилад для вимірювання та реєстрації температури; 10 – реостат.

## Порядок виконання роботи

1. Визначити масу форми  $G_{\text{Ф}}$ , додаткового обладнання  $G_{\text{дод}}$ , кришки  $G_{\text{К}}$  та корпусу  $G_{\text{кор}}$ . Визначити кількість залитої в лабораторну пропарювальну камеру води  $G_{\text{В}}$  на початку досліді по її рівню в камері  $h_{\text{П}}$ .

2. Відформувати дослідний зразок 2 у формі. При формуванні закладають термопари 4 і 5. Визначити масу сухих складових бетону  $G_c$ , води за творення  $G_{вз}$  та загальну масу зразка  $G_b$ .

3. Записати отримані дані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Дослідні дані

Величина	$G_b$	$G_v$	$G_f$	$G_c$	$G_{вз}$	$G_{кор}$	$G_{дод}$	$G_K$	$G_{вк}$	$\Delta G_v$
Маса, кг (г)										

4. Розмістити дослідний зразок 2 у пропарювальній камері 1. Підключити вимірювальний прилад 9.

5. Визначити температуру навколишнього середовища  $t_c$  та барометричний тиск  $P_0$  в приміщенні.

6. Провести дослід при заданому температурному режимі.

7. В процесі дослідів визначити температури на початку та в кінці дослідного періоду:

- на поверхні виробу  $t_{п.м}$ , в центрі виробу  $t_{ц}$ , між формою і виробом  $t_{ф}$  та пароповітряної суміші  $t_{п.с}$ ;
- кришки у 3...5 точках (переносною терморпарою) і визначити середнє значення цих температур;
- аналогічно виміряти температуру поверхні корпусу вище рівня  $t_{кор}^B$  і нижче рівня  $t_{кор}^H$  води та температуру дна  $t_{дна}$ .

8. Виключити нагрів та розібрати установку. Визначити залишковий рівень  $h_k$ , і масу води  $G_{вк}$  та масу випарованої води  $\Delta G_v$ .

9. Отримані результати занести в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Дослідні дані

Період нагріву	Температура, °C							
	$t_{п.м}$	$t_{ц}$	$t_{ф}$	$t_{п.с}$	$t_K$	$t_{кор}^B$	$t_{кор}^H$	$t_{д}$
початок								
кінець								



## Порядок обробки результатів

### *I. Прихід тепла:*

- 1) Теплота, внесена дослідним зразком:

$$Q_{61} = G_6 \frac{G_C c_C + G_{B3} c_B}{G_C + G_{B3}}, \quad (4.5)$$

до  $c_C$  - теплоємність сухих складових бетону, кДж/(кг·К);  $c_B$  - теплоємність води, кДж/(кг·К).

- 2) Теплота матеріалу форми:

$$Q_{Ф1} = G_Ф \cdot c_М \cdot t_С, \quad (4.6)$$

де  $c_М$  – теплоємність металу, кДж/(кг·К);  $t_П$  – температура початку дослідного періоду, °С.

- 3) Теплота води в камері на початку дослідного періоду:

$$Q_{В1} = G_B \cdot c_B \cdot t_П. \quad (4.6)$$

- 4) Теплота матеріалу огорожувальних конструкцій:

$$Q_{огр1} = \sum_{i=1}^n G_i \cdot c_М \cdot t_П, \quad (4.7)$$

де  $G_i$  – маса огорожувальних конструкцій (корпус, кришка і т.д.).

- 5) Теплота додаткового обладнання:

$$Q_{Д1} = G_{дод} \cdot c_М \cdot t_П. \quad (4.8)$$

- 6) Теплота, яку виділяє нагрівальний елемент (ТЕН):

$$Q_{н1} = U \cdot I \cdot \tau, \quad (4.9)$$

де  $U$  – напруга, В;  $I$  – струм, А;  $\tau$  - час нагріву, с.

### *II. Витрати тепла:*

- 1) На нагрів дослідного зразка:

$$Q_{62} = G_6 \frac{G_0 c_C + G_{B3} c_B}{G_0 + G_{B3}} \left[ \frac{t_{П.М} + 2t_{П}}{3} - t_П \right]. \quad (4.10)$$

- 2) На нагрів форми:

$$Q_{Ф2} = G_Ф \cdot c_М \cdot (t_Ф - t_П). \quad (4.11)$$

- 3). На нагрів води в камері:

$$Q_{В2} = G_B \cdot c_B \cdot (t_B - t_П). \quad (4.12)$$

- 4) На випаровування води:

$$Q_{В2} = r \cdot \rho \cdot (h_П - h_К) \cdot S, \quad (4.13)$$

де  $g$  – теплота пароутворення води ( $g = 2500$  кДж/кг);  $S$  – площа перерізу по поверхні води в камері,  $m^2$ ;  $\rho$  – густина вода,  $kg/m^3$ .

5) На нагрів матеріалу огороджувальних конструкцій:

$$Q_{M2} = \left( \sum_{i=1}^n G_i \cdot (t_1 - t_{п}) \right) \cdot c_M, \quad (4.14)$$

де  $t_1$  – температура відповідних елементів пропарювальної камери (кришки, дна, корпусу вище і нижче рівня води);  $G_i$  – масу відповідного елемента  $G_i = \rho_i V_i$ , де  $V_i$  – об'єм елементів огородження,  $m^3$ ;  $\rho_i$  – густина матеріалу,  $kg/m^3$  (для металу  $\rho_M = 7800$   $kg/m^3$ ).

6) На нагрів додаткового обладнання:

$$Q_{Д2} = G_{дод} \cdot c_M \cdot (t_H - t_{п}), \quad (4.15)$$

де  $t_H$  – температура насичення,  $^{\circ}C$ .

7) Теплота водяної пари, яка заповнює вільний простір:

$$Q_{П2} = V \cdot \rho_{п} \cdot i_{п}, \quad (4.16)$$

де  $\rho_{п}$  – густина водяної пари при температурі нагріву (береться з таблиці насиченої водяної пари, див. додаток 3),  $kg/m^3$ ;  $V$  – вільний об'єм камери,  $m^3$ ;  $i_{п}$  – ентальпія водяної пари при температурі середовища, кДж/кг.

8) Втрати тепла через огорожувальні конструкції:

$$Q_{отр2} = \left( \sum_{i=1}^n F_i k_i (t_{п.с} - t_{п}) \right) \tau, \quad (4.17)$$

де  $k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$  – коефіцієнт теплопередачі,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;

де  $\delta_i$  – товщина шару стінки,  $m$ ;  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності відповідного матеріалу,  $Вт/(m \cdot K)$ ;  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої стінки,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ . ( $\alpha_1 = 50 \dots 70$ ,  $\alpha_2 = 5 \dots 10$ ).

9) Невраховані втрати 5...7% від загальних витрат тепла.

Отримані значення звести в табл. 4.3, проаналізувати їх та зробити висновки.

Таблиця 4.3

## Тепловий баланс

Назва статті балансу	Позначення	Кількість тепла	
		кДж/період	%
<b>1. Прихідна частина балансу</b>			
...	...	...	...
Всього прихідної частини	$\Sigma Q_H$		
<b>2. Витратна частина балансу</b>			
...	...	...	...
Всього витратної частини	$\Sigma Q_B$		
Розходження прихідної і витратної частини			

**Контрольні питання**

1. Пояснити принципи складання матеріального балансу.
2. Пояснити принципи складання теплового балансу.
3. Перерахувати статті, які входять в матеріальний баланс.
4. Перерахувати статті, які входять в тепловий баланс.

## ДОДАТКИ

### Додаток 1

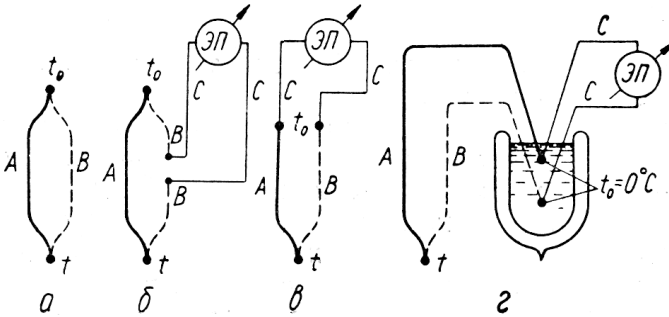
#### Короткі відомості про термопару

Вимірювання температури термопарами (термоелектричними пірометрами) засновано на властивості різнорідних металів, а також напівпровідників утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу (термоЕРС), що залежить від матеріалу електродів і температури спаю.

Утворення термоЕРС пояснюється тим, що в міжмолекулярному просторі провідників концентрація вільних електронів в одиниці об'єму залежить від роду провідника і його температури. Тому при стиканні двох різнорідних провідників, однаково нагрітих, вільні електрони будуть дифундувати з провідника з більшою концентрацією електронів в одиниці об'єму в провідник з меншою концентрацією.

Електричне коло, наведене на рис. Д.1, *a*, складається з термоелектродів А та В, що мають два спаї з температурою  $t$  і  $t_0$ . В залежності від температур  $t$  і  $t_0$  у спаях виникають відповідно термоЕРС  $E_{AB}(t)$  і  $E_{AB}(t_0)$ , спрямовані назустріч один одному. Результуюча термоЕРС для цього кола:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0).$$



**Рис. Д.1.** Схеми термоелектричних контурів:

*a* — принципова схема контуру термопару; *б* — підключення вимірювального приладу в термоелектрод; *в* — підключення вимірювального приладу у вільний кінець; *z* — термостатування температури холодного спаю.

Для вимірювання результуючої термоЕРС у контур термопару включають чутливий електричний прилад ЗП зі шкалою, градуйованою в мілівольтах або градусах (рис. Д.1, *б* і *в*).

Таким чином, термоелектричний пірометр складається з термопару *AB* і підключеного до неї за допомогою сполучних провідників *C* електровимірювального приладу ЗП. Якщо одну з температур весь час підтримувати постійною (наприклад,  $t_0=0^\circ\text{C}$ , тобто відповідати температурі плавлення льоду — рис. Д.1, *z*), то величина термоЕРС буде залежати тільки від однієї температури :

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t).$$

В процесі вимірювання нижній спай занурюється у вимірюване середовище; він називається *гарячим* спаєм, а верхній — *холодним*. Холодні спаї термопар повинні знаходитися при постійній температурі, для чого їх поміщають у термостат (рис. Д.1, з). Крім того, постійність температури холодного спаю досягається застосуванням так званих компенсаційних дрітків. За допомогою останніх видаляють холодний спай від голівки термопарі якнайдалі, у зону з постійною і більш низькою температурою, де мається можливість помістити них у термостат.

Термоелектроди виготовляють із дроту різних металів діаметром 0,5...3 мм. Матеріали термоелектродів, крім великої ЕРС, повинні мати хорошу електропровідність, сталість термоелектричних властивостей і стійкість проти окислювання і дії високих температур.

Матеріалом для виготовлення термоелектродів служать платина і платинородій, мідь, залізо, хромель (90%Ni і 10% Cr), алюмель (95% Ni, 2% Mn, 2% Al, 1% Si) та ін. Найбільше поширення одержали наступні термопар: платина-платинородій, хромель-алюмель, хромель-копель, залізо-константан і мідь-константан. Ці термопар стандартизовані, верхні межі їх виміру коливаються від 350 до 1300°C. Точність вимірювання лежить в межах 0,02...1%.

## Додаток 2

### Параметри насиченої водяної пари від температури

t, °C	P, кПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	i, кДж/кг	i <sub>n</sub> , кДж/кг	r, кДж/кг
0	0,6108	0,00485	0	2501	2501
10	1,2271	0,0094	41,99	2519	2477
20	2,3368	0,0173	83,86	2538	2454
30	4,2417	0,0304	126,66	2556	2430
40	7,3749	0,0512	167,46	2574	2407
50	12,633	0,0831	209,26	2592	2383
60	19,919	0,1302	251,09	2610	2358
70	31,161	0,1982	292,97	2627	2334
80	47,359	0,2934	334,92	2644	2309
90	70,108	0,4235	376,94	2660	2283
100	101,325	0,5977	419,06	2676	2257
120	198,54	1,121	503,7	2707	2203
140	361,36	1,966	589,1	2734	2145
160	618,04	3,258	675,5	2758	2082
180	1002,7	6,157	763,1	2777	2014
200	1555,1	7,862	852,4	2791	1939
250	3980	19,98	1085,7	2801	1715
300	8590	46,21	1344,9	2749	1404

*Додаток 3*  
*Параметри пароповітряної суміші при 101,3 кПа*

Температура суміші, °С	Парціальний тиск насиченої водяної пари в суміші, кПа	Густина, кг/м <sup>3</sup>	
		сухого повітря	насиченої пароповітряної суміші
5	0,872	1,27	1,270
10	1,288	1,248	1,242
15	1,705	1,226	1,218
20	2,338	1,205	1,195
24	2,984	1,189	1,176
28	3,780	1,173	1,156
32	4,754	1,157	1,136
36	5,941	1,142	1,116
40	7,375	1,128	1,097
44	9,101	1,114	1,076
48	11,604	1,100	1,054
52	13,612	1,086	1,031
55	16,732	1,076	1,013
60	19,918	1,060	0,983
62	21,838	1,054	0,969
64	23,905	1,048	0,957
66	26,145	1,041	0,942
68	28,558	1,035	0,929
70	31,157	1,029	0,912
72	33,944	1,023	0,896
74	36,967	1,017	0,879
76	40,183	1,011	0,863
78	43,636	1,006	0,844
80	47,343	1,000	0,826
82	51,222	0,944	0,807
84	55,569	0,989	0,786
86	60,115	0,983	0,769
88	64,941	0,978	0,746
90	70,101	0,973	0,724
92	75,594	0,967	0,701
94	81,447	0,962	0,678
96	87,673	0,957	0,652
98	94,299	0,961	0,625
100	101,325	0,947	0,599

*Додаток 4*  
*Теплофізичні характеристики матеріалів*

Матеріал	$\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$
Бетон	2400	1,45	0,84
Залізобетон	2400	1,56	0,84
Метал (сталь)	7800	56,0	0,46
Керамзитобетон	900	0,408	0,88
Кварцовий пісок	1500	0,6	0,796
Вапняк	–	–	0,930
Глина	–	–	0,921
Мінеральна вата	300	0,063	0,75
Дерево	640	0,38	2,40
Накип	1200	0,20	–
Цегла: звичайна	1800	0,47	0,921
шамотна	1200	0,35	0,837
діатомітова	1100	0,27	0,845
Вода при $t, \text{°C}$	0	1001	4,221
	20	999	4,185
	60	984	4,187
Повітря при $t, \text{°C}$	0	1,254	1,0056
	50	1,06	1,0056

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання : навчальний посібник: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону. Рівне : НУВГП, 2010. 230 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2268>.
2. Бордюженко О. М., Карпюк А. А. Теплові установки промисловості будівельних матеріалів : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2012. 123 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/7419>
3. Шестаков В. Л. Термодинаміка : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2009. 150 с.
4. Гоц В. І., Кокшарьов В. М., Павлюк В. В., Тимошенко С. А. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів : підручник. К. : Основа, 2014. 360 с.
5. Теплотехніка / Драганов Б. Х., Долінський А. А. та ін. Київ, 2005.