

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторної роботи**

**«Дослідження темпу нагрівання термічно тонкого тіла»  
з дисципліни «Тепло- і масообмін»**

для студентів спеціальності

144 «Теплоенергетика»

Харків 2021



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторної роботи**  
**«Дослідження темпу нагрівання термічно тонкого тіла»**  
**з дисципліни «Тепло- і масообмін»**

для студентів спеціальності  
144 «Теплоенергетика»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 2 від 29.06.21 р.

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2021

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження темпу нагрівання термічно тонкого тіла» з дисципліни «Тепло- і масообмін» для студентів спеціальності 144 – «Теплоенергетика» / упоряд. В.В. Пильов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 14 с.

Укладачі: В.В. Пильов

О.В. Алтухова

Рецензент О.М. Тарасенко

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

## ВСТУП

Вміння вирішувати задачі нестационарного теплообміну є важливою частиною курсу «Тепло- і масообмін», оскільки це є необхідним при дослідженні явищ термічного навантаження та втоми деталей машин та теплоенергетичних установок, визначення необхідних температурних режимів печей при прогріві болванок, охолодженні ливарних форм та вирішенні інших інженерних завдань.

Окрім цього, найбільш точні сучасні способи визначення теплофізичних властивостей нових речовин базуються на дослідженні нестационарної теплопровідності їх зразків.

Метою лабораторної роботи є дослідження процесу нагрівання й охолодження термічно тонкого тіла як найпростішого з математичної точки зору випадку нестационарної задачі, що дозволяє студентам ознайомитись з методами проведення відповідних експериментів та обробки їх результатів.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Процес нестационарного теплообміну, при якому температурний стан тіла при незмінних заданих граничних умовах 3-го роду змінюється з плином часу від відповідного початкової умові до рівноважного стаціонарного стану, складається з двох етапів. Підчас першого, що називають *невпорядкованою стадією*, температура окремих точок тіла змінюється за різномірними залежностями, узгоджуючись між цими точками та з граничними

умовами. На другому, що носить назву *регулярного режиму*, надлишкова температура усіх точок тіла змінюється узгоджено, експоненційно прагнути до рівноважного квазістаціонарного стану, що описується залежністю

$$\vartheta = Ae^{-m\tau}, \quad (1)$$

де  $\vartheta$  – надлишкова температура, що є різницею між дійсною температурою  $t$  та температурою середовища  $t_{\infty}$ , °C;

$A$  – сталий коефіцієнт, K;

$\tau$  – час, що пройшов з початку процесу, с;

$m$  – стала, що не залежить від часу та від точки тіла та носить назву темпу нагрівання (охолодження), с<sup>-1</sup>.

Зворотну до темпу нагрівання величину називають *постійною часу*:

$$\varepsilon = \frac{1}{m}. \quad (2)$$

Приклад процесів зміни температури для різних точок тіла подано на рис. 1. В логарифмічному вигляді

$$\ln \vartheta = \ln A - m\tau \quad (3)$$

графік зміни температури на регулярному режимі повинен представляти собою пряму лінію, як можна побачити на рис.1, через постійне значення темпу нагрівання.

Після диференціювання рівняння (2) залежність темпу нагрівання від надлишкової температури тіла приймає вигляд

$$m = -\frac{1}{\vartheta} \frac{d\vartheta}{d\tau}. \quad (4)$$

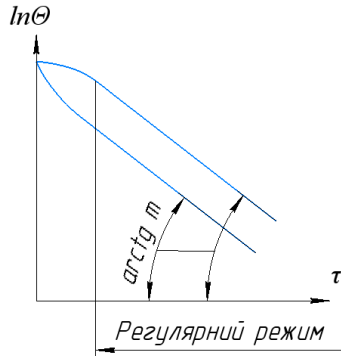


Рисунок 1 – Зміна надлишкової температури точок довільного тіла в логарифмічному вигляді

Враховуючи диференціальне рівняння балансу теплоти, що поглинається речовиною і надходить теплообміном,

$$c_v V \frac{d\bar{\vartheta}_v}{d\tau} = -\bar{\alpha} \bar{\vartheta}_F F, \quad (5)$$

може бути отримано вираз для визначення темпу нагрівання

$$m = \Psi \frac{\bar{\alpha} F}{c_v V}, \quad (6)$$

де  $c_v$  – питома теплоємність, Дж/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм тіла, м<sup>3</sup>;

$\bar{\alpha}$  – середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$F$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>;

$\bar{\vartheta}_v$  – середня надлишкова температура об'єму тіла, К;

$\bar{g}_F$  – середня надлишкова температура поверхні тіла, К;

$\Psi = \frac{\bar{g}_F}{\bar{g}_v}$  – коефіцієнт форми тіла.

*Термічно тонким* називають тіло, зміною температури по перетину якого можна знехтувати. У цьому випадку середня температура за об'ємом і по поверхні тіла однакова,  $\Psi = 1$ , а поточну температуру тіла може бути знайдено з рівняння теплового балансу тіла в часі безпосередньо.

Ознакою того, що при поточних умовах однозначності тіло може вважатися термічно тонким, є значення числа Біо близьке до нуля:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} L}{\lambda} < 0,1, \quad (7)$$

де  $L$  – характерний лінійний розмір тіла, м;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу тіла, Вт/(м·К).

З математичної точки зору процес досягнення врівноваженого квазістаціонарного стану буде відбуватися нескінченно довго. На практиці зазвичай рівноважний стан вважають досягнутим, якщо зміна температури між замірами стає порівняною з зоною нечутливості вимірювального прибору або флуктуаціями температури середовища. Але треба розуміти, що на протязі значного проміжку часу значення експериментальної температури встановлення ще може змінитися, наближуючись до дійсної.

## 2. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальне дослідження нагрівання (охолодження) тонкого тіла проводиться на установці (рис. 2), яка являє собою ніхромову стрічку перетином 10 x 1 мм з густиною  $\rho = 0,47$  Ом·мм<sup>2</sup>/м та питомою теплоємністю  $c_v = 3,68 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>К), навиту на ізольований каркас, і яка нагрівається електричним струмом через силовий понижуючий трансформатор 5. Сила



струму, яка вимірюється амперметром 6, підключеним через вимірювальний трансформатор 4 з коефіцієнтом трансформації 10, протягом дослідів повинна залишатися незмінною. Для її регулювання перед початком випробування слугує реостат 7.

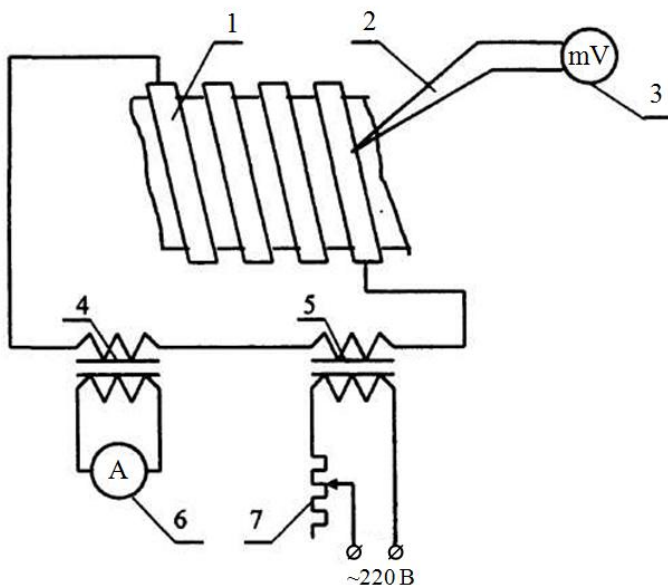


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки:

1 – ніхромової стрічки; 2 – термопара хромель-алюмель; 3 – мілівольтметр;  
4, 5 – вимірювальний і силовий трансформатори; 6 – амперметр; 7 – реостат

Температура стрічки вимірюється хромель-алюмелевою термопарою 2, підключеною до цифрового мілівольтметра 3. Гарячий спай термопари приєднано до стрічки, а холодний має температуру навколишнього середовища, яка вимірюється рідинним термометром розширення. У зв'язку з тим, що внутрішній опір останнього дуже великий, його показання і визначає

ЕРС термопар.

Час, що пройшов з моменту початку випробування, вимірюється секундоміром.

### 3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Підчас лабораторної роботи студенти розділяються на дві підгрупи, одна з яких виконує дослідження нагрівання, а інша – охолодження.

При дослідженні процесу нагрівання початкова температура стрічки дорівнює температурі навколишнього середовища  $t_c$ , що фіксується в протоколі випробування. Початком випробування ( $\tau = 0$ ) вважається момент включення струму. Вимірювання температури проводяться від включення струму до усталеного стану періодично: на початку процесу через 20 с (протягом 3 ÷ 4 хв), потім 10 хв через 60 с, а в кінці процесу через 120 с. Якщо за інтервал вимірювання температура стрічки змінилася менш ніж на 1 % від загальної зміни за весь час процесу  $t - t_c$ , вважається, що стаціонарний режим досягнутий, а поточна температура приймається експериментально знайденою температурою встановлення  $t_{вст}$ . Величина струму  $I$  (з урахуванням коефіцієнта трансформації) разом з вказаними температурами фіксуються в протоколі випробування (рис. 3).

Струм

$I = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A,}$

Температура середовища

$t_c = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ\text{C}$

Температура встановлення

$t_{вст} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ\text{C}$

| $\tau, \text{ c}$ | $E(t, t_c),$<br>$\text{mV}$ | $E(t, 0), \text{mV}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\Theta$ | $\ln\Theta$ |
|-------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------|-------------|
| 0                 |                             |                      |                     |          |             |
| 20                |                             |                      |                     |          |             |
| ...               |                             |                      |                     |          |             |

Рисунок 3 – Протокол випробування

Перед дослідженням процесу охолодження слід переконатися в стаціонарності температурного стану установки і занести в протокол початкову температуру стрічки при  $\tau = 0$  і температуру середовища  $t_c$ . Початком випробування вважається момент вимкнення струму. З цього моменту проводяться вимірювання температури стрічки: на початку процесу через 20 с (протягом  $3 \div 4$ хв), потім 10 хв через 60 с, а в кінці процесу через 120 с. Тривалість випробування становить  $15 \div 20$  хв. Остання виміряна температура вважається експериментальною температурою встановлення в процесі охолодження. Всі вимірювання також фіксуються в протоколі.

Виміряні ЕРС термопар  $E(t, t_c)$  повинні бути приведені до  $0^\circ\text{C}$  додаванням ЕРС холодного паю при  $0^\circ\text{C}$   $E(t_c, 0)$ . Після цього, на основі залежності ЕРС  $E(t, 0)$  від температури в табл. 1, знаходяться температури стрічки  $t$  в зафіксовані моменти часу.

Після визначення температур встановлення для процесів розраховується безрозмірна температура  $\Theta$  та її логарифм  $\ln\Theta$ .

Формула для обох процесів має схожу форму, відрізняючись лише тим, які температури відповідають їх початковому і кінцевому станам. При цьому, для процесу охолодження відома дійсна температура встановлення, що відповідає температурі навколишнього середовища. Для процесу нагрівання, оскільки дійсна температура встановлення невідома, вимушено використовуємо експериментально визначену.

Таким чином, при нагріванні

$$\Theta_{\text{наг}} = \frac{t_{\text{вст}} - t}{t_{\text{вст}} - t_c}. \quad (8)$$

При охолодженні

$$\Theta_{\text{охл}} = \frac{t - t_c}{t_{\text{вст}} - t_c}. \quad (9)$$

Визначення темпу нагріву вимагає побудови графіків  $\Theta(\tau)$  та  $\ln\Theta(\tau)$ . Їх очікуваний вигляд подано на рис. 4 та рис.5.

Таблиця 1 – Залежність ЕРС хромель-алюмелевої термопарі  
від температури горячего спаю при температурі холодного 0<sup>0</sup>С

| °C  | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | 0     | 0,04  | 0,08  | 0,12  | 0,16  | 0,20  | 0,24  | 0,28  | 0,32  | 0,38  |
| 10  | 0,40  | 0,44  | 0,48  | 0,52  | 0,56  | 0,60  | 0,64  | 0,68  | 0,72  | 0,76  |
| 20  | 0,80  | 0,84  | 0,88  | 0,92  | 0,96  | 1,00  | 1,04  | 1,08  | 1,12  | 1,16  |
| 30  | 1,20  | 1,24  | 1,28  | 1,32  | 1,36  | 1,41  | 1,45  | 1,49  | 1,53  | 1,57  |
| 40  | 1,61  | 1,65  | 1,69  | 1,73  | 1,77  | 1,82  | 1,86  | 1,90  | 1,94  | 1,98  |
| 50  | 2,02  | 2,06  | 2,10  | 2,14  | 2,18  | 2,23  | 2,27  | 2,31  | 2,35  | 2,39  |
| 60  | 2,43  | 2,47  | 2,51  | 2,56  | 2,60  | 2,64  | 2,68  | 2,72  | 2,77  | 2,81  |
| 70  | 2,85  | 2,89  | 2,93  | 2,97  | 3,01  | 3,06  | 3,10  | 3,14  | 3,18  | 3,22  |
| 80  | 3,26  | 3,30  | 3,34  | 3,39  | 3,43  | 3,47  | 3,51  | 3,55  | 3,60  | 3,64  |
| 90  | 3,68  | 3,72  | 3,76  | 3,81  | 3,85  | 3,89  | 3,93  | 3,97  | 4,02  | 4,06  |
| 100 | 4,10  | 4,14  | 4,18  | 4,22  | 4,26  | 4,31  | 4,35  | 4,39  | 4,43  | 4,47  |
| 110 | 4,51  | 4,55  | 4,59  | 4,63  | 4,67  | 4,72  | 4,76  | 4,80  | 4,84  | 4,88  |
| 120 | 4,92  | 4,96  | 5,00  | 5,04  | 5,08  | 5,13  | 5,17  | 5,21  | 5,25  | 5,29  |
| 130 | 5,33  | 5,37  | 5,41  | 5,45  | 5,49  | 5,53  | 5,57  | 5,61  | 5,65  | 5,69  |
| 140 | 5,73  | 5,77  | 5,81  | 5,85  | 5,89  | 5,93  | 5,97  | 6,01  | 6,05  | 6,09  |
| 150 | 6,13  | 6,17  | 6,21  | 6,25  | 6,29  | 6,33  | 6,37  | 6,41  | 6,45  | 6,49  |
| 160 | 6,53  | 6,57  | 6,61  | 6,65  | 6,69  | 6,73  | 6,77  | 6,81  | 6,85  | 6,89  |
| 170 | 6,93  | 6,97  | 7,01  | 7,05  | 7,09  | 7,13  | 7,17  | 7,21  | 7,25  | 7,29  |
| 180 | 7,33  | 7,37  | 7,41  | 7,45  | 7,49  | 7,53  | 7,57  | 7,61  | 7,65  | 7,69  |
| 190 | 7,73  | 7,77  | 7,81  | 7,85  | 7,89  | 7,93  | 7,97  | 8,01  | 8,05  | 8,09  |
| 200 | 8,13  | 8,17  | 8,21  | 8,25  | 8,29  | 8,33  | 8,37  | 8,41  | 8,45  | 8,49  |
| 210 | 8,53  | 8,57  | 8,61  | 8,65  | 8,69  | 8,73  | 8,77  | 8,81  | 8,85  | 8,89  |
| 220 | 8,93  | 8,97  | 9,01  | 9,05  | 9,09  | 9,14  | 9,18  | 9,22  | 9,26  | 9,30  |
| 230 | 9,34  | 9,38  | 9,42  | 9,46  | 9,50  | 9,54  | 9,58  | 9,62  | 9,66  | 9,70  |
| 240 | 9,74  | 9,78  | 9,82  | 9,86  | 9,90  | 9,95  | 9,99  | 10,03 | 10,07 | 10,11 |
| 250 | 10,15 | 10,19 | 10,23 | 10,27 | 10,31 | 10,35 | 10,40 | 10,44 | 10,48 | 10,52 |
| 260 | 10,56 | 10,60 | 10,64 | 10,68 | 10,72 | 10,77 | 10,81 | 10,85 | 10,89 | 10,93 |
| 270 | 10,97 | 11,01 | 11,05 | 11,09 | 11,13 | 11,18 | 11,22 | 11,26 | 11,30 | 11,34 |
| 280 | 11,38 | 11,42 | 11,46 | 11,51 | 11,55 | 11,59 | 11,63 | 11,67 | 11,72 | 11,76 |
| 290 | 11,80 | 11,84 | 11,88 | 11,92 | 11,96 | 12,01 | 12,05 | 12,09 | 12,13 | 12,17 |
| 300 | 12,21 | 12,25 | 12,29 | 12,33 | 12,37 | 12,42 | 12,46 | 12,50 | 12,54 | 12,58 |

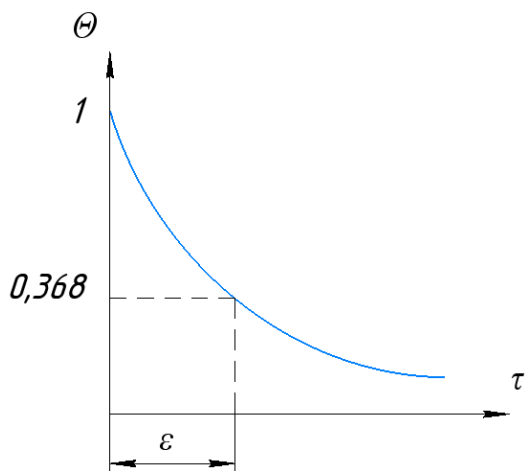


Рисунок 4 – Визначення сталої часу за безрозмірною температурою

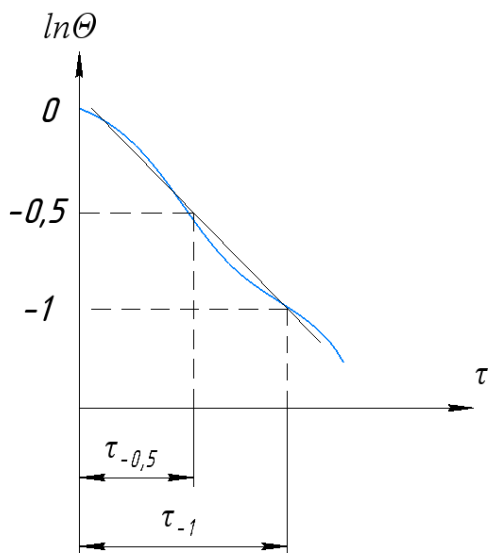


Рисунок 5 – Зміна логарифму безрозмірної температури

З рівнянь (1) і (2) виходить, що при  $\tau = \varepsilon$

$$\Theta(-1) = \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon}\right) = 0,368. \quad (10)$$

Таким чином, постійна часу  $\varepsilon$  може бути визначена як абсциса графіка для  $\Theta = 0,368$ .

Враховуючи, що

$$m = \frac{\alpha F}{c_v V}, \quad (11)$$

зі значення постійної часу визначаємо середній коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{c_v V_l}{\varepsilon F_l}. \quad (12)$$

Якщо в результаті експерименту отримана нелінійна залежність  $\ln\Theta(\tau)$  на значному протязі часу після завершення неупорядкованої стадії, то це свідчить про змінність коефіцієнта тепловіддачі. В цьому випадку необхідно визначити усереднений для заданого проміжку часу темп нагрівання (охолодження) як тангенс кута нахилу дотичної, проведеної до графіка  $\ln\Theta(\tau)$ . Для цього на дотичній слід обрати дві довільні точки.

Темп нагрівання (охолодження) на основі значень графіка для них:

$$m = \frac{\ln \Theta_1 - \ln \Theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (13)$$

За усередненим темпом нагрівання (охолодження) визначаємо усереднене значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{mc_v V}{F} . \quad (14)$$

З балансу теплоти для стаціонарного стану при відомому коефіцієнті тепловіддачі, що вважаємо рівним усередненому, стає можливим визначення дійсної температури встановлення:

$$t_{ycm} = \frac{q_v V}{\alpha F} + t_c , \quad (15)$$

де  $q_v$  – густина внутрішніх джерел теплоти, що визначається величиною струму і опором стрічки для її погонного метра:

$$q_v = \frac{I^2 R_l}{V_l} = \frac{I^2 \rho}{S V_l} , \quad (16)$$

де  $S = 10 \text{ мм}^2$  – перетин стрічки;

$V_l = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{м}$  – об’єм погонного метра стрічки.

У висновках до роботи необхідно порівняти температури встановлення, отримані в роботі експериментально, з їх розрахунковим та точним значенням для процесів нагрівання і охолодження відповідно; пояснити відмінність отриманого в роботі графіку  $\ln\Theta(\tau)$  від прямої лінії; порівняти результати дослідження процесів нагрівання та охолодження.

#### 4. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОБОТИ

1. Дати визначення термічно тонкого тіла.
2. За яких умов тіло може бути віднесено до термічно тонких?
3. Зробити аналітичний запис темпу нагрівання для термічно тонкого тіла та в загальному вигляді.

4. Що є характерною особливістю регулярного режиму нестационарного процесу?

5. Пояснити, що входить до виразу безрозмірної температури. Чому можуть дорівнювати її значення.

6. Дати визначення постійної часу, в яких одиницях вона вимірюється?

7. Зазначити три шляхи визначення темпу нагрівання на основі даних експерименту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва : Энергия, 1965. – 424 с.

2. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, Михеева И.М. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.

3. Акмен Р.Г. Тепло- и массообмен. Текст лекций и задачи с комментариями к решению. Для студентов специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент»: – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007.– 146с.

## ЗМІСТ

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Вступ .....                             | 3  |
| 1. Постановка завдання .....            | 3  |
| 2. Опис лабораторної установки .....    | 6  |
| 3. Порядок виконання роботи .....       | 8  |
| 4. Контрольні запитання до роботи ..... | 13 |
| Список літератури .....                 | 14 |



Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до лабораторної роботи  
«Дослідження темпу нагрівання термічно тонкого тіла»  
з дисципліни «Тепло- і масообмін»

Укладачі: ПИЛЬОВ Вячеслав Володимирович  
АЛТУХОВА Ольга Василівна

Відповідальний за випуск проф. Антон ГАНЖА

Роботу до видання рекомендував доц. Лариса ТЮТЮННИК

В авторській редакції

План 2021 р. п. 232.

Підписано до друку 13.07.21. Формат 60х84 1/16. Папір друк №2.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,81 .

Обл.-вид. арк. 0,88 . Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Самостійне електронне видання