

---

## Дослідження регулярного теплового режиму в рідинному середовищі обмеженого тонкостінним металевим циліндром

**Ольга Власенко**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0002-8975-0873

**Станіслав Ткаченко**

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

ORCID 0000-0002-4904-4608

**Владислав Ткачук**

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

ORCID 0009-0009-3189-5234

### Для цитування цієї статті:

Власенко Ольга, Ткаченко Станіслав, Ткачук Владислав. Дослідження регулярного теплового режиму в рідинному середовищі обмеженого тонкостінним металевим циліндром. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 4, 2023, pp. 35-46. doi:10.46299/j.isjea.20230204.05.

**Надійшла до редакції:** 26 червня 2023 р.; **Схвалено:** 19 липня 2023 р.;

**Опубліковано:** 01 серпня 2023 р.

---

**Анотація:** Проведено експериментальні дослідження інтенсивності теплообміну від вертикальної металеві циліндричної стінки до дослідних рідинних середовищ з відомою інформацією про теплофізичні властивості.

Експерименти проведені на стенді, який входить в експериментально-розрахунковий метод. Складається із зовнішньої металеві посудини, яка має циліндричну форму, внутрішньої металеві циліндричної посудини, ізолюваної ззовні металеві кришки, термопар, пристрою збирання інформації з термопар та її передавання на портативний комп'ютер.

В процесі дослідження встановлено, що для дослідної систем витримується співвідношення надлишкової температури  $\ln(v) = f(\tau)$ , яке характерне для регулярного теплового режиму твердих тіл.

**Ключові слова:** темп охолодження (нагрівання), регулярний тепловий режим, термопара, надлишкова температура.

---

## 1. Вступ

Існує три основних шляхи передачі теплоти. У рідинах теплота часто передається шляхом конвекції, коли рух самої рідини переносить теплоту з одного місця в інше. Іншим способом передачі теплоти є теплопровідність, яка не передбачає руху речовини, а скоріше є передачею енергії всередині речовини (або між речовинами, які контактують). Третій спосіб передачі енергії – це випромінювання, яке передбачає поглинання або віддавання електромагнітних хвиль. Передача теплоти в рідинах зазвичай відбувається за допомогою конвекції.

Конвекційні потоки встановлюються в рідині, тому що більш гаряча частина рідини не така щільна, як холодніша частина, тому на більш гарячу рідину діє висхідна виштовхувальна сила, що змушує її підніматися, а більш холодна, щільна рідина опускається.

Примусова конвекція, коли рідина не тече сама по собі, а виштовхується, часто використовується для нагрівання або охолодження.

Теплопровідність і конвекція залежать від різниці температур; радіація теж, але для радіації важлива абсолютна температура. У деяких випадках один спосіб теплопередачі може домінувати над двома іншими, але часто теплопередача відбувається за допомогою двох або навіть усіх трьох процесів одночасно.

Конвекція є найбільш ефективним і поширеним способом передачі тепла через рідини та гази. Це відбувається, коли деякі області рідини стають гарячішими, ніж інші, викликаючи струми в рідині, які переміщують її, розподіляючи тепло більш рівномірно.

При теплопровідності теплота передається всередині об'єкта. Коли об'єкт є рідиною, теплота може передаватися від рідини до іншого об'єкта через потік рідини на поверхні об'єкта. Такий вид теплопередачі називається конвекцією. Конвекція може передати більшу кількість теплоти, ніж теплопровідність. Коефіцієнт тепловіддачі виражає кількість тепла, що передається між рідиною (рідиною або газом) і твердою поверхнею шляхом конвекції. Теплота може переходити від рідини до поверхні або навпаки. Коефіцієнт теплопередачі залежить від типу рідини, стану її течії та форми об'єкта. Чим більше коефіцієнт теплопередачі, тим більше відбувається теплопередача. Загалом, чим більша теплопровідність рідини, тим більший коефіцієнт теплопередачі. Тому коефіцієнт теплопередачі для рідини вищий, ніж для газу.

Іншим фактором, який сильно впливає на величину коефіцієнта теплопередачі, є швидкість потоку рідини над поверхнею об'єкта. Чим вище швидкість, тим більше коефіцієнт теплопередачі. Тому тепловіддача за рахунок вимушеної конвекції більша, ніж за природної конвекції.

Раніше було розроблено декілька швидкісних методів визначення теплових властивостей різних матеріалів, теорія регулярного теплового режиму (РТР) була застосована для рішення питань термометрії, анемометрії і гідрометрії, для теплових розрахунків по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі та ін. Теорія регулярного режиму багатокomпонентних, особливо двокомпонентних, тіл привела до побудови нових приладів: бікалориметрів для вимірювання теплозахисних властивостей тканин і одягу, приладів для визначення теплопровідності рідин та інших нових приладів. Таким чином, в даний момент теорія регулярного режиму стала корисна при рішенні різних практичних задач, частково вона стала основою техніки теплових вимірів. З іншої сторони, основні положення теорії регулярного режиму не являються результатом одних лише аналітичних операцій [1].

Усі тіла, які знаходяться в технологічній системі, контактують з навколишнім середовищем. Між ними може бути теплообмін в умовах природньої конвекції, наприклад вузли устаткування віддають теплоту у повітря, яке оточує робоче місце. Теплообмін може відбуватися при вимушеній конвекції, коли тверде тіло обмінюється теплотою з рідиною або газом, які рухаються навколо.

Регулярний тепловий режим тіла або системи тіл характеризує процес охолодження або нагрівання під час якого:

- на закон зміни температури не впливає початковий розподіл температури в системі;
- закон зміни температури записується в простій математичній формі;
- закон зміни температури є загальним для всіх точок дослідної системи.

За допомогою закономірностей регулярного теплового режиму розроблено ряд методів визначення теплових характеристик різних матеріалів; визначено теплову інерцію термометрів і пірометрів; отримано співвідношення для розрахунку кінетики охолодження або нагрівання складних нетехнічних апаратів і обладнання [2].

Регулярний тепловий режим – це режим нагрівання або охолодження тіла, під час якого логарифм надлишкової температури  $\text{Ln}\vartheta$  ( $\vartheta$  – надлишкова температура) в будь-якій точці дослідного тіла змінюється прямолінійно:

$$\text{Ln}\vartheta = \text{Ln}(T_1 - T_2). \quad (1)$$

$T_1$  – температура навколишнього середовища;

$T_2$  – температура зразка.

Рівняння Фур'є для регулярного режиму представляється наступним чином:

$$\vartheta = A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-m\tau}. \quad (2)$$

$A$  – стала, яка залежить від початкового розподілу температур по поверхні (від початкових умов);

$U$  – стала, яка є температурною функцією лише координат, і характеризує просторовий розподіл температур у зразку;

$m$  – стала, яка залежить від геометрії тіла, від теплофізичних властивостей, від інтенсивності теплообміну;  $\epsilon$  темпом охолодження (нагрівання) дослідного зразка.

Зміна надлишкової температури у просторі, так у часі залежить від початкового розподілу температури тіла. Провівши логарифмування рівняння (2) та опускаючи індекси, маємо:

$$\text{Ln}\vartheta = \text{Ln}(AU) - m \cdot \tau \quad (3)$$

або

$$\text{Ln}\vartheta = -m \cdot \tau + C(x, y, z). \quad (4)$$

Рівняння (4) показує, що натуральний логарифм надлишкової температури всіх точок тіла змінюється у часі за лінійним законом [2].

Провівши диференціювання лівої та правої частин рівняння (4) у часі маємо:

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{d\vartheta}{d\tau} = -m = \text{const}. \quad (5)$$

Визначивши експериментально зміну надлишкової температури  $\vartheta$  в часі  $\tau$ , при цьому побудувавши залежність в напівлогарифмічних координатах, то очевидно, що темп охолодження в стадії регулярного режиму знаходиться:

$$\frac{\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = m = \text{const}. \quad (6)$$

Аналітично і експериментально залежність (6) отримана для твердих тіл.

Отже,  $(\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2)$  – безрозмірна величина

$$\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2 = \text{Ln} \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}. \quad (7)$$

Існування регулярного теплового режиму характеризується лінійністю зміни логарифма надлишкової температури тіла (системи тіл) в часі  $\tau$

$$\text{Ln}\vartheta = -m\tau + C. \quad (8)$$

де  $m$  – темп охолодження (нагрівання) тіла (системи тіл) в часі  $\tau$ ,  $C$  – коефіцієнт рівняння.

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Теплообмінні процеси в багатофазних і багатокомпонентних середовищах. Інтенсивність теплообміну в багатофазних і багатокомпонентних середовищах.

## 3. Мета дослідження

Визначити ознаки існування регулярного теплового режиму в рідинному середовищі, яке знаходиться в тонкостінній металевій посудині.

## 4. Аналіз літератури

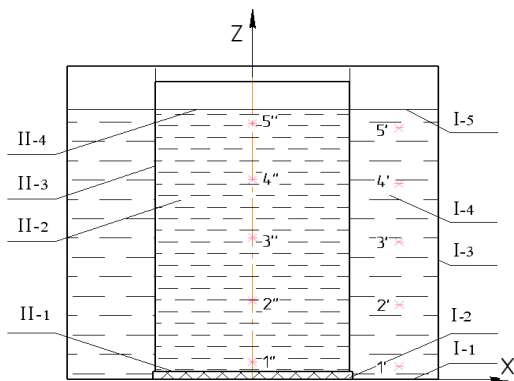
Під тепловим регулярним режимом тіла або системи тіл розуміють такий процес охолодження або нагрівання системи, коли:

- 1) початковий розподіл температури в системі не впливає на закон зміни температури;
- 2) закон зміни температури виражається в простій математичній формі;
- 3) цей закон є загальним для всіх точок системи. Ці закономірності теплового регулярного режиму дозволили:

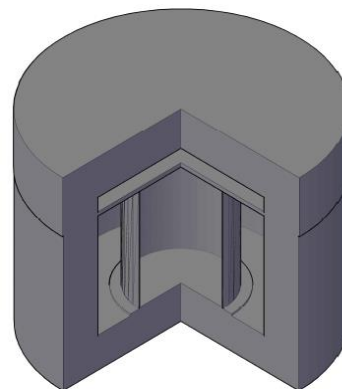
- розробити ряд методів визначення теплових характеристик різних матеріалів;
- визначити теплову інерцію термометрів і пірометрів;
- отримати співвідношення для розрахунку кінетики охолодження або нагрівання складних на той час нетехнічних апаратів і обладнання [2].

## 5. Методи дослідження

Експериментальні результати одержані на стенді, який являється складовою експериментально-розрахункового методу [6]. На рис.1 представлена система «навколишнє середовище (НС) I – тіло II». В зовнішній посудині I-3 знаходиться навколишнє рідинне середовище (вода) I-4 з відповідною температурою  $T_1$ . У внутрішній циліндричній посудині II-3 – дослідне рідинне середовище II-2 з відповідною температурою  $T_2$ . Вимірювання температур під час дослідження відбувається в п'яти точках кожного середовища за допомогою термозондів (I'-5', I''-5'') [7].



**Рисунок 1.** Базова експериментальна установка: навколишнє середовище I (I-1, I-2, I-3, I-4, I-5); тіло II (II-1, II-2, II-3, II-4).



**Рисунок 2.** Схема експериментальної установки в 3D зображенні.

На рис.1 навколишнє середовище I: I-1 – металеве днище; I-2 – ізолювана підставка; I-3 – зовнішній ізолюваний циліндр; I-4 – вода; I-5 – вільна поверхня води. Тіло II: II-1 – металеве дно; II-2 – досліджуване рідинне середовище; II-3 – тонкостінна металева циліндрична посудина діаметром 100/99 мм; II-4 – вільна поверхня тіла II [2].

Темп охолодження (нагрівання)  $m$  розраховується з використанням наступної формули –  $m = \frac{\ln\vartheta_1 - \ln\vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}$ , де  $\vartheta_1, \vartheta_2$  – надлишкові температури на початку  $\tau_1$  та кінці  $\tau_2$  дослідження, °C.

З використанням термопар, які з'єднані з портативним комп'ютером, знімаються значення температур в обох середовищах. Значення температур самостійно записуються в програму Microsoft Excel (рис. 2) [8].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Type log name here										
2	Poll definition: ID = 1, Function = 03, Address = 0, ScanRate = 1000										
3											
4	09/23/20 08:48:04	795	811	820	829	288	191	190	194	215	833
5	09/23/20 08:48:14	790	812	820	825	252	194	193	203	236	830
6	09/23/20 08:48:25	773	804	817	821	223	196	201	212	277	825
7	09/23/20 08:48:36	764	809	818	822	213	201	213	239	317	821
8	09/23/20 08:48:47	752	802	818	820	225	201	213	245	335	816
9	09/23/20 08:48:57	744	797	813	819	230	204	217	255	354	814
10	09/23/20 08:49:07	742	795	810	817	229	207	221	268	374	812
11	09/23/20 08:49:18	735	789	808	814	222	212	230	293	402	809

Рисунок 3. Фрагмент запису даних температур в програму Microsoft Excel.

Після проведення експериментів будується залежність температури води і дослідних рідинних середовищ в часі  $T=f(\tau)$ . Після чого визначається середньоарифметична температура для навколишнього середовища (води) і дослідного рідинного середовища. З використанням програмного забезпечення Visual Basic for Application (VBA) розраховується температура в потрібний діапазон часу експерименту (рис. 3, 4) [8].

```

tay0 = tay01 * 60 + tay02 MsgBox "Отримано таке значення: toy0=" & toy0, vbOKOnly, "Результат"
tay1 = tay11 * 60 + tay12 MsgBox "Отримано таке значення: toy1=" & toy1, vbOKOnly, "Результат"
tay2 = tay21 * 60 + tay22 MsgBox "Отримано таке значення: toy2=" & toy2, vbOKOnly, "Результат"
tay3 = tay31 * 60 + tay32 MsgBox "Отримано таке значення: toy3=" & toy3, vbOKOnly, "Результат"
tay4 = tay41 * 60 + tay42 MsgBox "Отримано таке значення: toy4=" & toy4, vbOKOnly, "Результат"
tay5 = tay51 * 60 + tay52 MsgBox "Отримано таке значення: toy5=" & toy5, vbOKOnly, "Результат"
tay6 = tay61 * 60 + tay62 MsgBox "Отримано таке значення: toy6=" & toy6, vbOKOnly, "Результат"
tay7 = tay71 * 60 + tay72 MsgBox "Отримано таке значення: toy7=" & toy7, vbOKOnly, "Результат"
tay8 = tay81 * 60 + tay82 MsgBox "Отримано таке значення: toy8=" & toy8, vbOKOnly, "Результат"
tay9 = tay91 * 60 + tay92 MsgBox "Отримано таке значення: toy9=" & toy9, vbOKOnly, "Результат"

```

Рисунок 4. Фрагменти розрахунку тривалості експерименту в VBA.

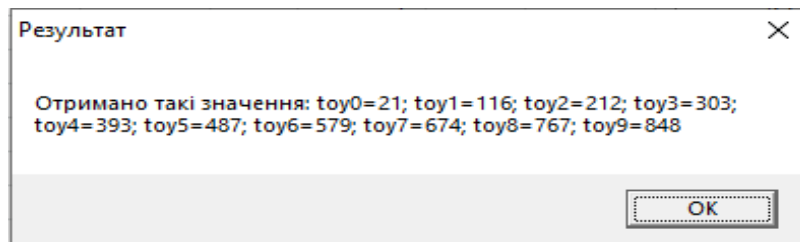
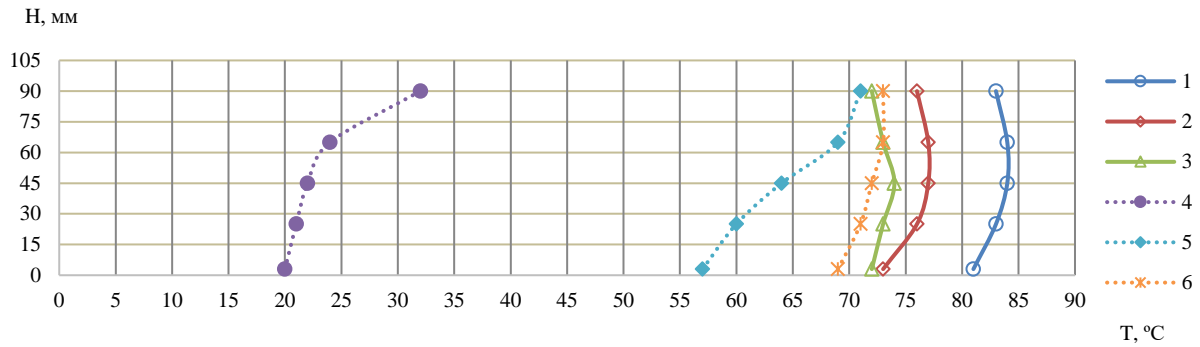


Рисунок 5. Отриманий результат.

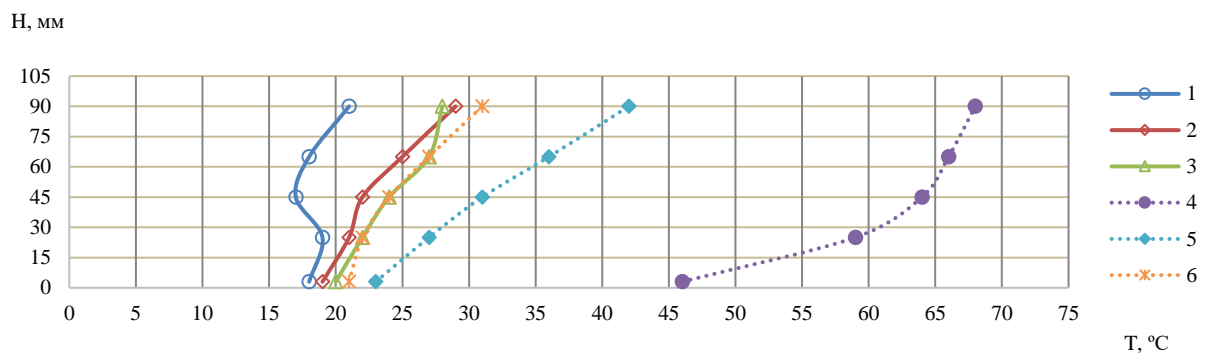
На рис. 5 зображено фрагмент отриманого результату температур, які використовується під час наступних розрахунків.

Раніше авторами досліджено коефіцієнт тепловіддачі до однофазних середовищ. Та було встановлено, що на дослідному проміжку витримується пряmolінійність для логарифму надлишкової температури  $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ , яке характерне для регулярного теплового режиму твердих тіл та системи з твердих тіл.

Відхилення значень температур від середньооб'ємної на різній висоті зонда термопар показано на рис 6-7 у різний момент часу (на початку, всередині та в кінці досліду), у внутрішній циліндричній металевій посудині під час вільної конвекції, яке виникає через термічну інерцію.



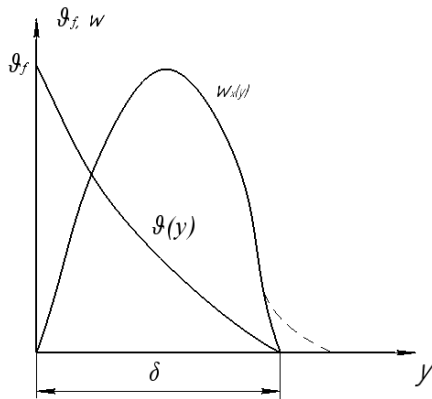
**Рисунок 6.** Розподіл температур вздовж теплообмінної поверхні під час нагрівання за умов вільної конвекції. Передача теплоти вода-соняшникова олія: 1, 2, 3 – розподіл температур у зовнішній порожнині 4, 5, 6 – у внутрішній порожнині  $\tau_0$  – початковий,  $1/2\tau$  – середній,  $\tau$  – кінцевий, відповідно.



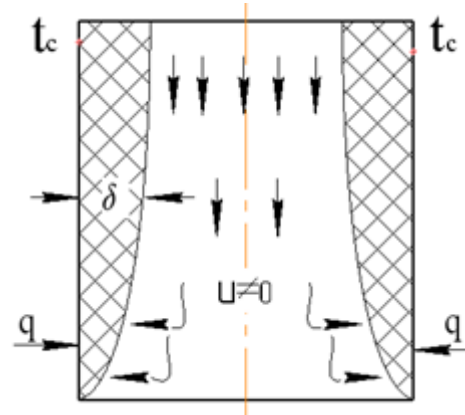
**Рисунок 7.** Розподіл температур вздовж теплообмінної поверхні під час охолодження за умов вільної конвекції. Передача теплоти вода-соняшникова олія: 1, 2, 3 – розподіл температур у зовнішній порожнині 4, 5, 6 – у внутрішній порожнині,  $\tau_0$  – початковий,  $1/2\tau$  – середній,  $\tau$  – кінцевий, відповідно.

Відхилення значень температури від середньооб'ємної по висоті в момент часу у робочих об'ємах зовнішньої та внутрішньої посудин знаходиться в межах 10...38% для рідин в яких відома інформація по теплофізичним властивостям. Нерівномірність розподілу температур показує, що умови теплообміну нестационарні, питомий тепловий потік  $\overline{q_{ст}} \neq const$  та температура стінки  $\overline{t_{ст}} \neq const$ , змінні На рис. 8 показано рух дослідної рідини при вільній конвекції вздовж вертикальної циліндричної металевій стінки у «великому об'ємі». У «великому об'ємі» під час збільшення перепаду температур, відповідно збільшується різниця у теплопровідності, в'язкості, та теплоємності теплоносія у різних точках приграничного шару, а це впливає на інтенсивність теплообміну.

В умовах нагрівання дослідного рідинного середовища (рис.9) тепловий потік передається від зовнішнього гарячого теплоносія до тонкостінної металевій циліндричній посудині, від тонкостінної металевій циліндричній посудині до дослідного рідинного середовища і далі розповсюджується по об'єму рідини. Теплі маси рідини рухаються (швидкість не дорівнює нулю  $u \neq 0$ ) до низу посудини, при цьому холодні маси в пограничному тепловому шарі – заміщаються.



**Рисунок 8.** Розподіл температури і швидкості у великому об’ємі.



**Рисунок 9.** Характер зміни температури в приграничному теплову шарі при нагріванні в обмеженому об’ємі.

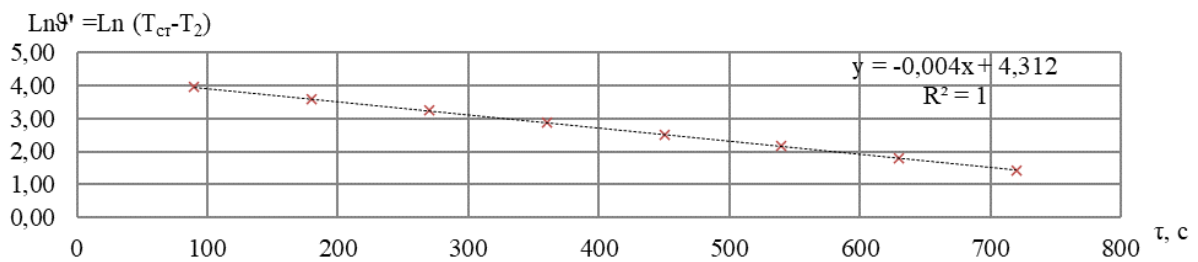
### 6. Результати дослідження

В попередніх роботах авторів встановлено, що в системі «рідина-тверде тіло» мають місце ознаки регулярного теплового режиму: темп охолодження (нагрівання) системи сталий  $-m = \text{const}$ ; коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем і системою «рідина-тверде тіло» практично сталий  $\alpha_1 \approx \text{const}$ ; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в системі «рідина-тверде тіло»  $\psi \approx \text{const}$  [9].

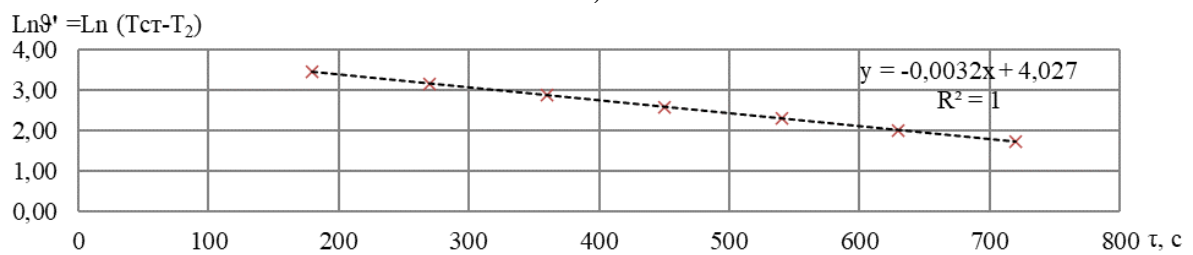
В умовах охолодження і нагрівання під час вільної і вимушеної конвекції встановлено, що темп охолодження (нагрівання) в системі «рідина-тверде тіло» не змінюється. В якості рідини досліджено: воду, соняшникову олію, цукровий розчин масовою концентрацією сухих речовин  $c=50\%$ ,  $c=60\%$ ,  $c=70\%$  [10, 11].

В наведеній роботі визначаються ознаки, які характеризують існування регулярного теплового режиму в рідинному середовищі, в якості навколишнього середовища – тонкостінна металева циліндрична посудина, яка нагрівається в гарячій воді (рис.10) та охолоджується в холодній воді (рис. 11).

Логарифм надлишкової температури для рідинного середовища  $-\text{Ln}\theta' = \text{Ln}(T_{\text{ст}} - T_2)$ , де  $T_{\text{ст}}$  – температура тонкостінного металевго циліндра, °C;  $T_2$  – температура досліджуваного рідинного середовища, °C.

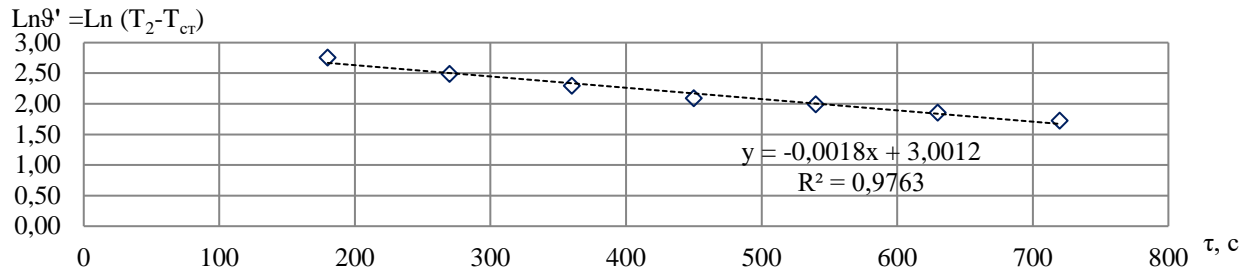


а)

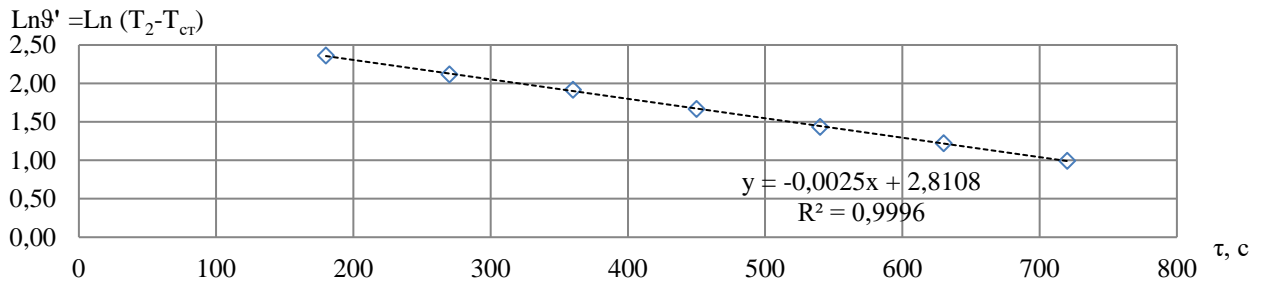


б)

**Рисунок 10.** Залежність логарифму надлишкової температури від часу для соняшникової олії (а) і цукрового розчину  $c=50\%$  (б) під час нагрівання в умовах вільної конвекції.



а)

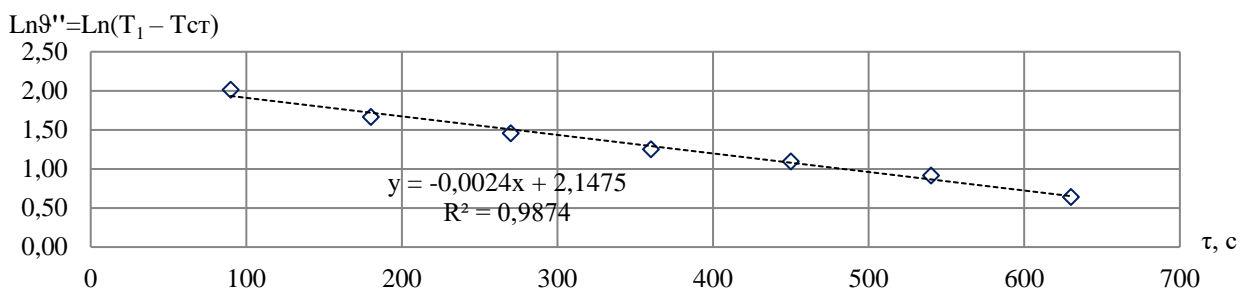


б)

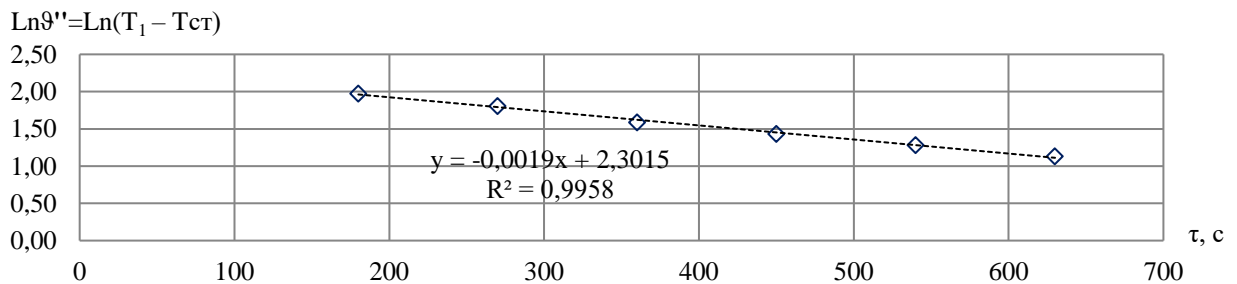
**Рисунок 11.** Залежність логарифму надлишкової температури від часу для соняшникової олії (а) і цукрового розчину  $c=50\%$  (б) під час охолодження в умовах вільної конвекції.

Встановлено існування регулярного теплового режиму в тонкостінній металевій циліндричній посудині, яка знаходиться між двома теплоносіями. Дослідження відбуваються під час вільної конвекції за умов нагрівання (рис.12) та охолодження (рис.13) тонкостінної металевій циліндричній посудини. Розглядається два варіанта заповнення посудини – цукровим розчином  $c=50\%$  та соняшниковою олією.

Для даного дослідження логарифм надлишкової температури для рідинного середовища –  $\text{Ln}\theta'' = \text{Ln}(T_1 - T_{\text{cr}})$ , де  $T_1$  – температура навколишнього середовища (води), °С.



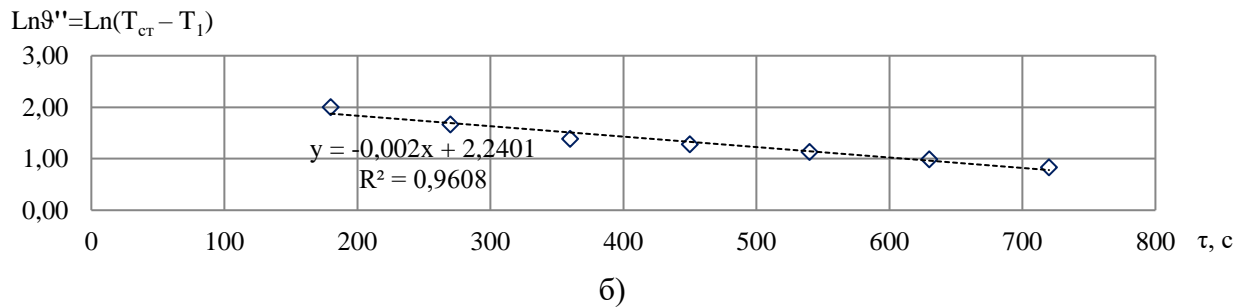
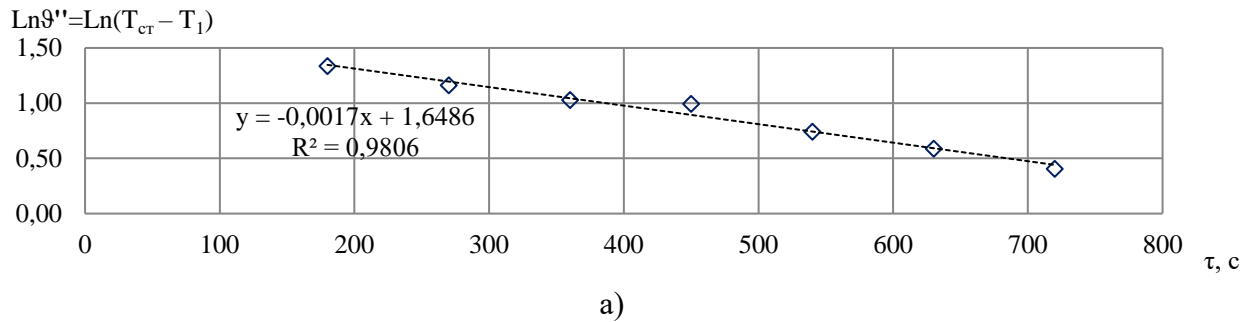
а)



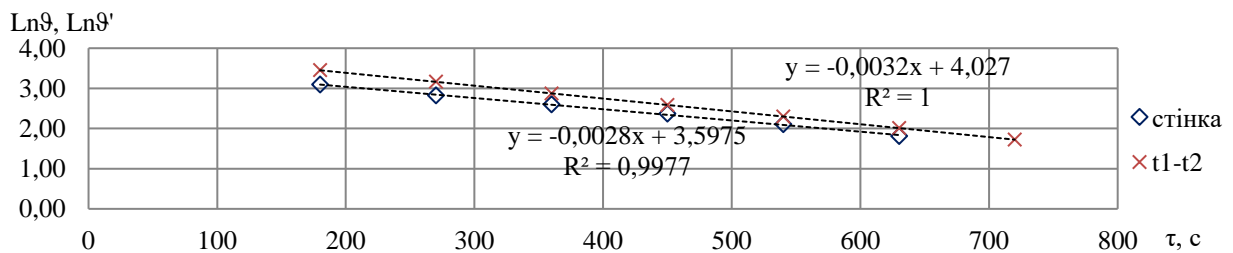
б)

**Рисунок 12.** Залежність логарифму надлишкової температури від часу для тонкостінної металевій циліндричній посудини заповненою соняшниковою олією (а) і цукровим розчином  $c=50\%$  (б) під час нагрівання в умовах вільної конвекції.



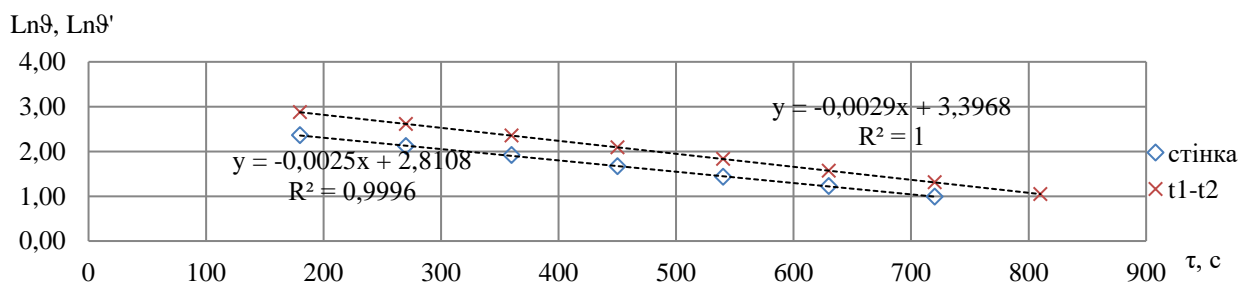


**Рисунок 13.** Залежність логарифму надлишкової температури від часу для тонкостінної металевої циліндричної посудини заповненою соняшниковою олією (а) і цукровим розчином  $c=50\%$  (б) під час охолодження в умовах вільної конвекції.



**Рисунок 14.** Співставлення  $\text{Ln}\theta$  і  $\text{Ln}\theta'$  від часу для цукрового розчину  $c=50\%$  під час нагрівання в умовах вільної конвекції.

Проведено співставлення логарифму надлишкової температури  $\text{Ln}\theta' = \text{Ln}(T_{\text{ст}} - T_2)$  та логарифму надлишкової температури  $\text{Ln}\theta = \text{Ln}(T_1 - T_2)$ . При нагріванні (рис. 14) цукрового розчину 50% – темп охолодження (нагрівання) складає  $m = 0,0028 \text{ c}^{-1}$ , а для системи «рідинне середовище (цукровий розчин 50%) – тонкостінна металева циліндрична посудина» –  $m' = 0,0032 \text{ c}^{-1}$ , розбіжність між  $m$  і  $m'$  становить 12,5%. При охолодженні (рис.15) розбіжність між  $m$  і  $m'$  – 13,8%.



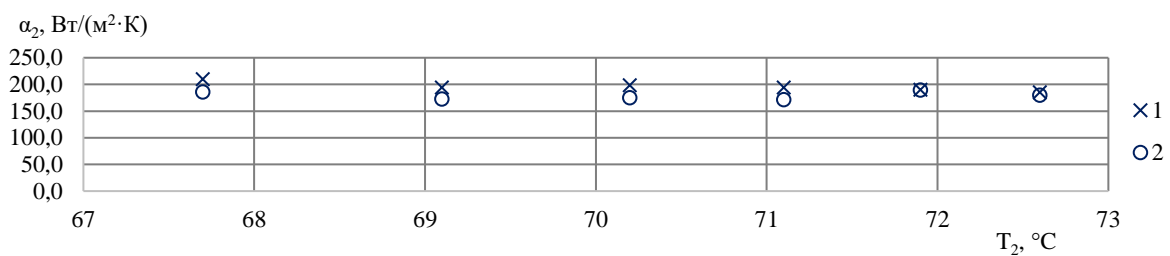
**Рисунок 15.** Співставлення  $\text{Ln}\theta$  і  $\text{Ln}\theta'$  від часу для цукрового розчину  $c=50\%$  під час охолодження в умовах вільної конвекції.

З використанням теорії регулярного теплового режиму проводиться розрахунок коефіцієнта тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}}$  від тонкостінної металевої циліндричної посудини до досліджуваного рідинного середовища [9, 12-13]

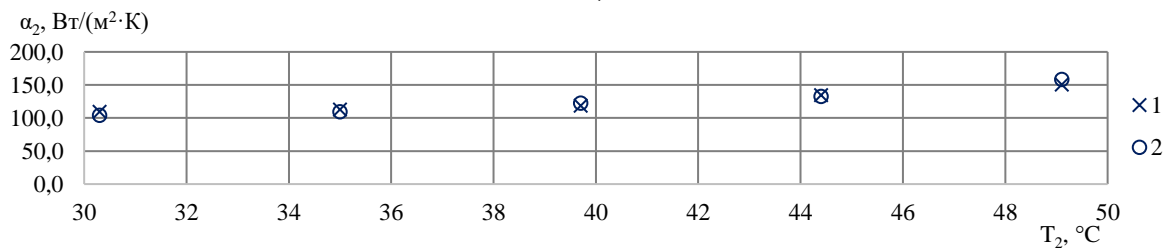
$$\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} + \frac{F \cdot \bar{\psi}}{m \cdot C_1}}, \quad (9)$$

де  $K_{\text{експ}}$  – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площа тонкостінного металевого циліндра, м<sup>2</sup>;  $C_1$  – повна теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/К.

Показники  $m$ ,  $\bar{\alpha}_1$  і  $\bar{\psi}$  розраховуються для всього діапазону досліджень, коефіцієнт теплопередачі  $K$  – окремо для кожної дослідної ділянки.

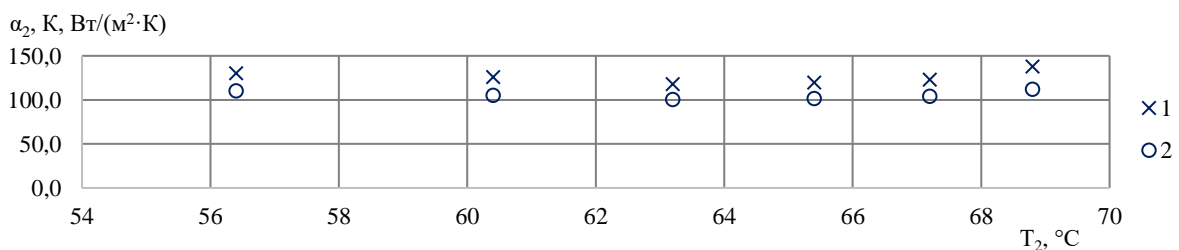


а)

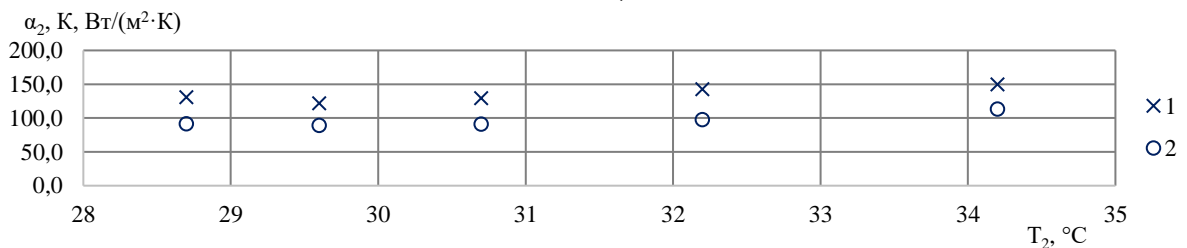


б)

**Рисунок 16.** Експериментальні результати для цукрового розчину  $c=50\%$  за умов нагрівання (а) і охолодження (б): 1)  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}}$ ; 2)  $K_{\text{експ}}$ .



а)



б)

**Рисунок 17.** Експериментальні результати для соняшникової олії за умов нагрівання (а) і охолодження (б): 1)  $\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}}$ ; 2)  $K_{\text{експ}}$ .

Практична користь від регулярного теплового режиму – застосування швидкісних методів визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів,  $\alpha$  – калориметр,  $\lambda$  – калориметр, визначення інтенсивності тепловіддачі  $\alpha$  – калориметр та вирішення питань термометрії, гідрометрії та анемометрії. В основі регулярного теплового режиму лежить теорія теплопровідності в твердих тілах, закон Фур'є [12, 13].

В разі застосування методів регулярного теплового режиму коефіцієнт теплопровідності визначається в реальних умовах теплообміну, коли у каналах відбувається складний теплообмінний процес, який характеризується взаємним впливом висхідного і низхідного потоків рідини, виникненням циркуляційних контурів [14].

## 7. Висновки

1) За результатами дослідження встановлено ознаки існування регулярного теплового режиму в двох системах:

- «рідинне середовище, оточене циліндричною тонкостінною металевією посудиною»;
- «тонкостінна металева циліндрична посудина, яка знаходиться між двома теплоносіями».

2) Застосування методів регулярного теплового режиму дає змогу прогнозувати коефіцієнти тепловіддачі в реальних умовах теплообміну, що поглиблює знання про механізми теплообміну у в'язких рідинних середовищах, підвищує точність оцінки інтенсивності теплообміну.

---

## Список літератури:

1) Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2017. 148с.

2) Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume. *Acta Innovations*. 2021. No. 42. P. 15-26. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>

3) Ткаченко С.Й., Резидент Н.В., Денесяк Д.І. Застосування методів регулярного теплового режиму для визначення інтенсивності теплообміну Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/4865/3967>

4) Юшко С.В., Борщ О.С., Юшко М.А. *Стаціонарна теплопровідність. Навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХП», 80, 2011.

5) Погорелов А. І. *Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку). Навчальний посібник для вузів. 2-ге видання*. Львів: «Новий Світ-2000», 2004.

6) Варгафтик Н. Б. *Теплопроводность жидкостей*. Известия ВТИ, 8, 6 – 11, 1949.

7) Великонська Н.М., Надточій А.А. *Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник*. Дніпро: НМетАУ, 78, 2018.

8) Власенко О., Задоян В. Використання мови програмування Visual Basic for Applications для обробки експериментальних даних. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Інноваційні технології в будівництві, Вінниця", 10-12 листопада 2020 р. Вінниця, ВНТУ.

9) Ткаченко С., Власенко О., Резидент Н. Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2. С. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

10) Heat exchangers for sugar factories and distilleries [Online]. Available: <https://www.barriquand.com/en/heat-exchangers-applications/heat-exchangers-agro-industry/heat-exchangers-sugar-ethanol/> Accessed on: April 18, 2023.

11) Plate Heat Exchanger For Sugar [Online]. Available: <https://www.hofmann-heatexchanger.com/solutions/plate-heat-exchanger-for-sugar>. Accessed on: April 18, 2023.

12) Власенко О.В., Дослідження теплообміну в об'ємі двофазної рідини за умов вимушеної її конвекції, *Вісник ВПІ*, вип. 6, с. 14–20, Лют. 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-14-20>

13) Ткаченко С. Й., Власенко О. В. Прогнозування інтенсивності теплообміну в біогазовому виробництві / // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування ": зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 3-4 (11-12). – С. 50-62. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.03.09>

14) Ткаченко С.Й., Резидент Н.В., Денесяк Д.І., Коба П.С. Регулярний режим нагрівання рідини в обмеженому об'ємі заповненому рідиною Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allfbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/4867/3968>

---

## Study of a regular thermal regime in a liquid medium limited by a thin-walled metal cylinder

### Olha Vlasenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID 0000-0002-8975-0873

### Stanislav Tkachenko

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

ORCID 0000-0002-4904-4608

### Vladyslav Tkachuk

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

ORCID 0009-0009-3189-5234

---

**Abstract:** Experimental studies of heat transfer from a vertical cylindrical wall to experimental environments with known information on thermophysical properties were performed. The research was conducted on an experimental stand, which consists of an outer metal vessel that has a cylindrical shape, an inner metal cylindrical vessel, an insulated metal cover from the outside, thermocouples, a device for collecting information from thermocouples and transferring it to a computer. It was determined that the relationship for the excess temperature  $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ , which is characteristic of the regular thermal regime of solid bodies, is maintained on the interval studied for the systems.

**Keywords:** cooling rate, regular regime, thermocouple, temperature.

---