

ВІЛЬНА КОНВЕКЦІЯ — ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В РІЗНИХ ШАРАХ ПО ВИСОТІ РІДИНИ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
²Вінницький національний технічний університет

Досліджено темп охолодження (нагрівання) дослідних рідин окремо для п'яти термопар, розташованих на різній висоті експериментального зонду.

Дослідження проведено на експериментальному стенді в системі «навколишнє середовище I — тіло II», де «навколишнє середовище I» — це вода, а «тіло II» — досліджуване рідинне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці в умовах вільної конвекції.

Вивчено темп охолодження (нагрівання) для дослідних рідин: вода, соняшникова олія, гліцерин дистильований.

Проаналізовано процеси охолодження (нагрівання) за умов вільної конвекції нестационарного теплообміну. Дослідження проведено на експериментальному стенді, який складається із зовнішньої металевієї посудини, в якій знаходиться навколишнє середовище з температурою t_1 , внутрішньої металевієї циліндричної посудини, в якій знаходиться дослідне рідинне середовище з температурою t_2 . Відповідно в гарячу та холодну рідини розміщували зонди з п'ятьма термопарами для вимірювання значень температур у фіксований час

Нестационарні процеси теплопровідності відбуваються за нагрівання або охолодження тіл, речовин, газових середовищ і супроводжуються зміною ентальпії. Нестационарний та стаціонарний процеси нагрівання тіла за рахунок внутрішнього джерела теплоти, електричного нагрівача досліджено в лабораторних умовах, визначено теплофізичні властивості матеріалів, тіл речовин, де охолодження відбувалося за рахунок навколишнього повітря.

Аналіз надлишкової температури, проведений окремо для кожної термопари, розміщеної по висоті циліндричного об'єму, показує, що зберігається лінійність залежності $Ln \vartheta = f(t)$, при цьому проявляється вплив вільної конвекції на величину m . Величина m залежить від висоти шару рідини, в якому вимірюється температура.

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

Вступ

Стан тіла, за якого температура в усіх його точках однакова і дорівнює температурі навколишнього середовища, називається станом теплової рівноваги. У стані теплової рівноваги теплообмін між тілом і середовищем відсутній. На відміну від стаціонарної теплопровідності, що характеризується постійним тепловим потоком у часі, в нестационарному тепловому процесі тепловий потік є змінною величиною. У разі нагрівання тіла в початковий момент часу, коли різниця температур між середовищем і тілом найбільша, тепловий потік від середовища до тіла максимальний. В процесі нагрівання тіла інтенсивність тепловіддачі зменшується і після досягнення стану теплової рівноваги тепловий потік стає рівним нулю [1], [2].

Процеси теплопровідності, за якими температурне поле змінюється з часом, називаються неусталеними або нестационарними. Температурне поле (просторова зміна температури) — це сукупність миттєвих значень температури в усіх точках тіла або системи тіл в певний момент. Температурне поле, що описується рівнянням $t = f(x, y, z, \tau)$ (де t — температура, x, y, z — просторові координати, τ — час), називається нестационарним. В цьому випадку температура в кожній точці тіла змінюється з часом [1], [2].

Нестационарні процеси теплопровідності відбуваються під час нагрівання або охолодження тіл, речовин, газових середовищ і супроводжуються зміною ентальпії. Нестационарний та стаціонарний

процеси нагріву тіла за рахунок внутрішнього джерела теплоти, електричного нагрівача, розглядаються в лабораторній практиці визначення теплофізичних властивостей матеріалів, тіл речовин і де охолодження відбувається за рахунок навколишнього повітря [1]—[3].

Комплексним вимірюванням та визначенням теплофізичних властивостей (ТФВ), таких як: об'ємна теплоємність c_p , теплопровідність λ і температуропровідність a , — в промисловості та наукових дослідженнях надається перевага, оскільки вони дозволяють одночасно визначати ТФВ для матеріалу за однакових параметрів тиску, температури, вологості, неоднорідності та засипки матеріалу тощо порівняно з окремими вимірюваннями цих властивостей. Для комплексних вимірювань ТФВ використовуються умови для нестационарного — регулярного режиму першого та другого роду, які мають загальну властивість — незалежність від часу відношення густини теплового потоку q в будь-якій точці тіла до густини теплового потоку на його поверхні q_n : $q/q_n = f(x, y, z)$ [1], [2].

Співвідношення для одномірних задач теплопровідності справедливе за наявності постійного джерела теплоти та регуляризації кінетики нагрівання чи охолодження в сталих зовнішніх умовах, яка відбувається не тільки за температурними полями, а й за тепловими потоками, тому їх можна не поділяти на задачі першого та другого роду, а розглядати як регулярний режим [1], [2].

Мета роботи — визначити темп охолодження (нагрівання) дослідної рідини окремо у кожній термопарі, розташованій на зонді на різній висоті.

Результати дослідження

Дослідження проведено на експериментальному стенді в системі «навколишнє середовище I — тіло II», де «навколишнє середовище I» — це вода, а «тіло II» — досліджуване рідинне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці в умовах вільної конвекції.

Вивчено темп охолодження (нагрівання). Проаналізовано процеси охолодження (нагрівання) під час вільної конвекції нестационарного теплообміну. В роботі дослідження здійснені на експериментальному стенді, який складається із зовнішньої металевої посудини, в якій знаходиться навколишнє середовище з температурою t_1 , внутрішньої металевої циліндричної посудини, діаметром 0,1 м, в якій знаходиться дослідне рідинне середовище з температурою t_2 . Відповідно, в гарячу та холодну рідини поміщають зонди з п'ятьма термопарами для зняття значень температур у фіксований час [4], [5].

Темп охолодження (нагрівання) m визначено згідно з [1] за формулою

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2},$$

де ϑ_1, ϑ_2 — надлишкові локальні температури тіла в початковий τ_1 та кінцевий τ_2 моменти часу відповідно, °C.

Вимірювання температур теплоносіїв здійснено в п'яти точках зовнішнього об'єму V_1 , та в п'яти точках у внутрішньому об'ємі V_2 , рівномірно розподілених вздовж теплообмінної поверхні термометрами опору. Фіксування температур відбувається одночасно в десяти точках [6].

Під час реалізації регулярного теплового режиму закон зміни середньооб'ємної температури в часі набуває простого і універсального вигляду: логарифм надлишкової температури тіла (об'єму рідини) змінюється в часі за лінійним законом [1]

$$\ln n = -mt + C. \quad (1)$$

Величина m , 1/с, характеризує інтенсивність охолодження (нагрівання) тіла (об'єму рідини) і називається темпом охолодження (нагрівання).

В табл. 1—4 подано експериментальні результати для соняшникової олії та дистильованого гліцерину під час нагрівання і охолодженні, за умов розташування термопар на висоті 3, 27, 44, 64, 90 мм. Крива (рис. 1) є апроксимацією дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції $\ln n = -mt + C$, де m — темп охолодження (нагрівання), C — коефіцієнт рівняння, R^2 — коефіцієнт детермінації. Отримана крива має лінійний характер, що відповідає регулярному тепловому режиму.

В процесі нагрівання соняшникової олії (табл. 1) темп охолодження (нагрівання) змінюється в залежності від висоти розташування термопар і знаходиться в межах 0,0031...0,0042, найбільше

значення $m = 0,0042$ на висоті $h = 64$ мм, а найменше — $m = 0,0031$; $h = 27$ мм. Коефіцієнт детермінації — $R^2 = 0,9880...0,9869$.

Таблиця 1

Нагрівання соняшникової олії

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $Ln \vartheta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Соняшникова олія	90	$y = -0,0041x + 3,9325$	0,9824
2		64	$y = 0,0042x + 4,3743$	0,9843
3		44	$y = -0,0038x + 4,512$	0,9822
4		27	$y = -0,0031x + 4,434$	0,9869
5		3	$y = -0,0033x + 4,495$	0,9880

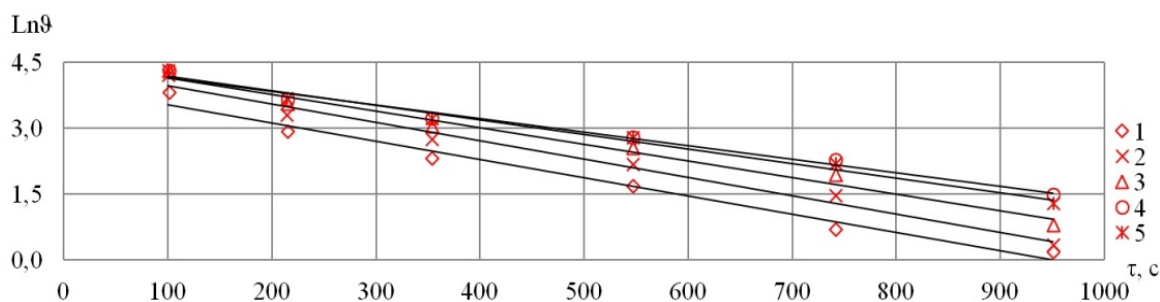


Рис. 1. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням у разі нагрівання соняшникової олії. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

В процесі охолодження соняшникової олії (табл. 2) темп охолодження (нагрівання) змінюється в межах $0,0028...0,0034$. Найбільше значення $m = 0,0034$ на висоті $h = 44$ мм, а найменше — $m = 0,0028$, коли $h = 3$ мм. Коефіцієнт детермінації змінюється у всьому діапазоні вимірювання температур по висоті $R^2 = 0,9966...0,9995$.

Таблиця 2

Охолодження соняшникової олії

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $Ln \vartheta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Соняшникова олія	90	$y = -0,0030x + 3,9554$	0,9993
2		64	$y = -0,0032x + 4,0731$	0,9966
3		44	$y = -0,0034x + 3,9919$	0,9935
4		27	$y = -0,0032x + 3,4712$	0,9995
5		3	$y = -0,0028x + 2,8643$	0,9977

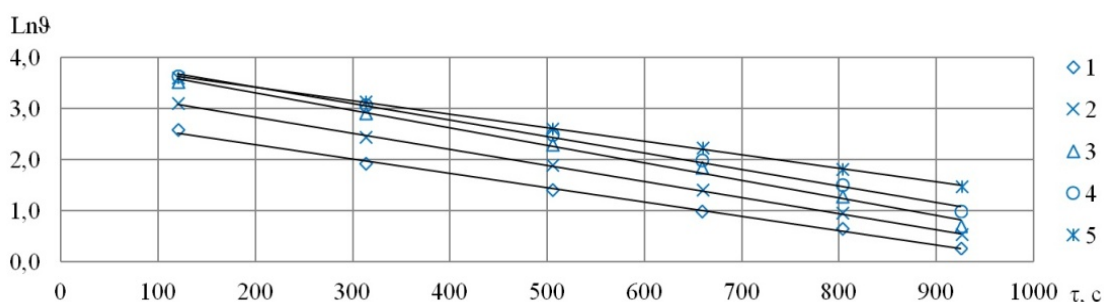


Рис. 2. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням у разі охолодження соняшникової олії. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

В процесі нагрівання гліцерину дистильованого (табл. 3) темп охолодження (нагрівання) змінюється в межах $0,0028...0,0033$. Найбільше значення $m = 0,0033$ на висоті $h = 3$ мм, а найменше — $m = 0,0028$; $h = 64$ мм. Коефіцієнт детермінації змінюється у всьому діапазоні вимірювання температур по висоті $R^2 = 0,9820...0,9983$.

Нагрівання гліцерину дистильованого

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $Ln \vartheta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Гліцерин дистильований	90	$y = -0,0029x + 6,5662$	0,9911
2		64	$y = -0,0028x + 6,5228$	0,9949
3		44	$y = -0,0029x + 6,5724$	0,9935
4		27	$y = -0,0032x + 6,4618$	0,9983
5		3	$y = -0,0033x + 6,0919$	0,9820

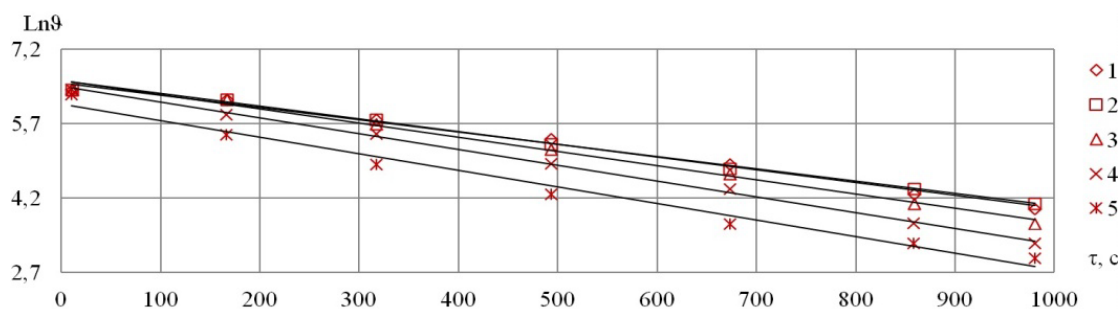


Рис. 3. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням у разі нагрівання гліцерину дистильованого. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

В процесі охолодження гліцерину дистильованого (табл. 4) темп охолодження (нагрівання) змінюється в залежності від висоти розташування термопар і знаходиться в межах 0,0015...0,0017, найбільше значення $m = 0,0017$ на висоті $h = 90$ мм, а найменше — $m = 0,0015$ за $h = 44$ мм. Коефіцієнт детермінації — $R^2 = 0,9804...0,9947$.

Охолодження гліцерину дистильованого

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $Ln \vartheta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Гліцерин дистильований	90	$y = -0,0017x + 5,8192$	0,9804
2		64	$y = -0,0016x + 6,1131$	0,9933
3		44	$y = -0,0015x + 6,1796$	0,9990
4		27	$y = -0,0016x + 6,2884$	0,9967
5		3	$y = -0,0016x + 6,2246$	0,9947

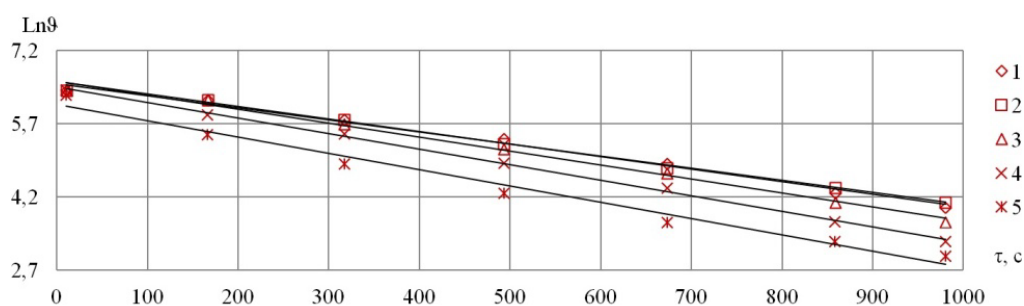


Рис. 4. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням у разі охолодження гліцерину дистильованого. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

Також визначається темп охолодження (нагрівання) води. Дослідження проводиться на експериментальному стенді, але взято внутрішню металеву циліндричну посудину, діаметром 0,05 м. Результати показані на рис. 5, 6 і в табл. 5, 6.

У разі нагрівання води (табл. 5) темп охолодження (нагрівання) змінюється в межах 0,0001...0,0004. Найбільше значення $m = 0,0004$ на висоті $h = 90$ мм, а найменше — $m = 0,0001$ на висоті $h = 3$ мм. Коефіцієнт детермінації змінюється у всьому діапазоні вимірювання температур по висоті $R^2 = 0,9214...0,9741$.

Нагрівання води

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Вода	90	$y = -0,0004x + 4,0345$	0,9214
2		64	$y = -0,0003x + 4,0546$	0,9692
3		44	$y = -0,0002x + 4,0766$	0,9647
4		27	$y = -0,0002x + 4,0852$	0,9358
5		3	$y = -0,0001x + 3,9642$	0,9741

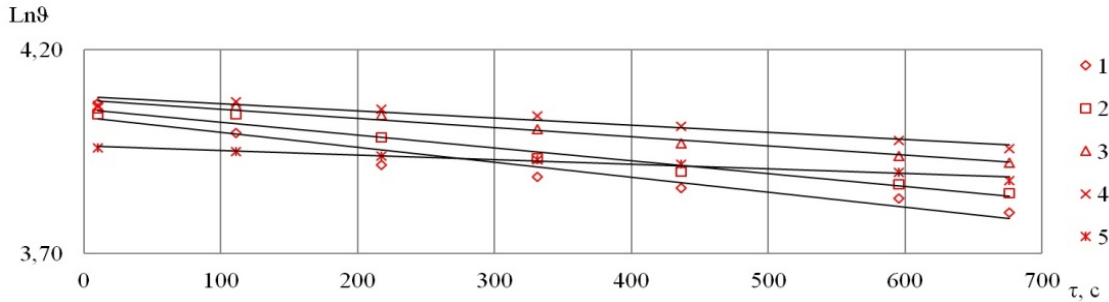


Рис. 5. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопарі з середньооб'ємним значенням у разі нагрівання води. Розташування термопар по висоті:

1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

В процесі охолодження води (табл. 6) темп охолодження (нагрівання) змінюється в межах 0,0002... ..0,0001, найбільше значення $m = 0,0018$ на висоті $h = 44$ мм, а найменше — $m = 0,0002$ на висоті $h = 3$ мм. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9114...0,9873$.

Охолодження води

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	Вода	90	$y = -0,0012x + 1,856$	0,9873
2		64	$y = -0,0013x + 2,3571$	0,9341
3		44	$y = -0,0015x + 3,0935$	0,9281
4		27	$y = -0,0017x + 2,9022$	0,9291
5		3	$y = -0,0015x + 2,9212$	0,9480

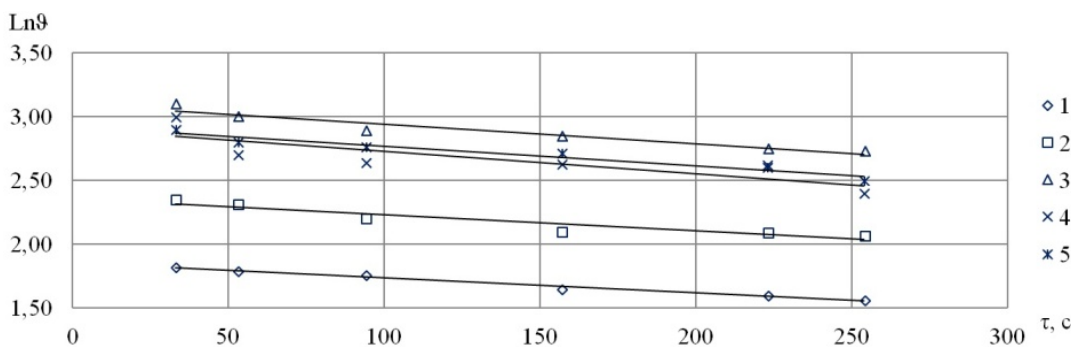


Рис. 6. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопарі з середньооб'ємним значенням у разі охолодження води. Розташування термопар по висоті:

1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

Висновки

1. Аналіз надлишкової температури, проведений окремо для кожної термопарі, розміщеної по висоті циліндричного об'єму, показує, що зберігається лінійність залежності $\text{Ln } \vartheta = f(\tau)$, при цьому проявляється вплив вільної конвекції на величину m . Величина m залежна від висоти шару рідини, в якому вимірюється температура.

2. Проаналізувавши розподіл надлишкової температури за часом $\text{Ln } \vartheta = f(\tau)$ для дослідних рідин у разі охолодження і нагрівання, визначено лінійний темп охолодження (нагрівання) $m = \text{const}$, що характерно для регулярного теплового режиму за охолодження (нагрівання) твердого тіла і підтримці сталості температури навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. М. Кондратьев, *Регулярный тепловой режим*. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954, 408 с.
- [2] В. А. Осипова, *Экспериментальное исследование процессов теплообмена*, М. П. Вукалович, Ред. М-Л : Энергия, 1964.
- [3] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел, *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975, 488 с.
- [4] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, і В. О. Задоян, «Темп охолодження (нагрівання) соняшникової олії в різних шарах по висоті циліндричного об'єму,» у *Тези наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ). Факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання*, 2021.
- [5] С. Й. Ткаченко, і О. В. Власенко, «Темп охолодження (нагрівання) рідинних середовищ з різними значеннями коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності,» у *Тези наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ). Факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання*, 2021.
- [6] С. Й. Ткаченко, і Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017, 148 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 31.10.2022

Власенко Ольга Володимирівна — науковий співробітник кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: olgakysak7@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ,

Ткаченко Станіслав Йосипович — д-р. техн. наук, професор, професор кафедри теплоенергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Vlasenko¹
S. Yo. Tkachenko²

Free Convection — Study of the Regular Thermal Mode in Different Layers at the Liquid Height

¹National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”;

²Vinnitsia National Technical University

The rate of cooling (heating) of experimental liquids is investigated separately for five thermocouples located at different heights of the experimental probe.

Research is carried out on an experimental stand in the system "environment I — body II", where "environment I" is water, and "body II" is the investigated liquid medium in a thin metal cylindrical shell under conditions of free convection.

The rate of cooling (heating) is studied for test liquids: water, sunflower oil, distilled glycerin.

The analysis of cooling (heating) processes during free convection of non-stationary heat exchange is carried out. This paper presents research carried out on an experimental stand, which consists of an external metal vessel, containing the environment with a temperature of t_1 , an internal cylindrical metal vessel containing an experimental liquid medium with a temperature of t_2 . Accordingly, probes with five thermocouples are placed in hot and cold liquids to take temperature values at a fixed time

Non-stationary heat conduction processes occur during heating or cooling of bodies, substances, gaseous media and are accompanied by a change in enthalpy. Non-stationary and stationary processes of body heating due to the internal heat source, the electric heater, are considered in laboratory practice to determine the thermophysical properties of materials, bodies of substances and where cooling occurs due to the surrounding air.

The analysis of the excess temperature, carried out separately for each thermocouple, placed along the height of the cylindrical volume, shows that the linearity of the dependence $\text{Ln } \vartheta = f(\tau)$ is preserved, while the influence of free convection on the value of m is manifested. The value of m depends on the height of the liquid layer in which the temperature is measured.

Keywords: cooling (heating) rate, regular thermal mode, thermocouple, excess temperature.

Vlasenko Olha V. — Researcher of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: olgakysak7@gmail.com ;

Tkachenko Stanislav Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Engineering, e-mail: stahit6937@gmail.com