

**ВИМУШЕНА КОНВЕКЦІЯ — ДОСЛІДЖЕННЯ
РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В РІЗНИХ
ШАРАХ ПО ВИСОТІ РІДИНИ**¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено темп охолодження/нагрівання 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» — вода, а «тіло II» — досліджуване рідинне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці в умовах вимушеної конвекції.

Регулярний режим охолодження/нагрівання об'єкта характеризується зміною температурного поля з часом, що описується експоненціальною залежністю, при цьому відносна швидкість охолодження t всіх точок тіла залишається постійною величиною, незалежною від координат і часу.

Теорія регулярного теплового режиму знайшла широке застосування для виконання багатьох практичних завдань: для визначення темпу охолодження/нагрівання тіла, для дослідження теплофізичних властивостей матеріалів, коефіцієнтів тепловіддачі та випромінювання, теплового опору тощо. Перевагами цього методу є те, що конструкція приладу і техніка проведення експерименту проста, точність отриманих результатів досить висока, а час експерименту невеликий.

Нестационарна теплопровідність відповідає несталою в часі тепловому режиму, створюваному тією чи іншою тепловою дією на тіло або середовище. Нестационарна теплопровідність характеризується тим, що температура змінюється не тільки від точки до точки, але і в часі. Нестационарна теплопровідність має місце у разі нагрівання або охолодження тіл, а також під час пуску або зупинки теплообмінних пристроїв, енергетичних агрегатів та ін.

Показані експериментальні результати дослідження темпу охолодження/нагрівання рідин окремо для п'яти термопар, розташованих на різній висоті експериментального зонду, за умов вимушеної конвекції.

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

Вступ

У процесах перенесення теплоти температурне поле тіла або системи завжди залежить від просторових координат. У протилежному випадку, як відомо, не буде перенесення теплоти. Але температура може змінюватися не тільки від точки до точки, але і з часом. Такі процеси теплопровідності, коли температурне поле в тілі змінюється як в просторі, так і в часі, називають нестационарними. Вони відбуваються в процесі нагрівання/охолодження різних виробів, пуску й зупинці різних теплообмінних пристроїв, енергетичних агрегатів, заморожуванні продуктів, випалюванні цегли, вулканізації гуми тощо [1].

Нестационарна теплопровідність відповідає несталою в часі тепловому режиму, створюваному будь-якою тепловою дією на тіло або середовище. Нестационарна теплопровідність характеризується тим, що температура змінюється не тільки від точки до точки, але й у часі. Нестационарна теплопровідність має місце при нагріванні або охолодженні тіл, а також під час пуску або зупинки теплообмінних пристроїв, енергетичних агрегатів та ін.

Серед практичних задач нестационарної теплопровідності важливе значення мають дві групи процесів: коли система прямує до стану теплової рівноваги та коли температура системи зазнає

періодичних змін. До першої групи належать процеси нагрівання або охолодження тіл, поміщених у середовище із заданими параметрами, наприклад, нагрівання болванки в печі, охолодження заготовленої заготовки деталі тощо. До другої групи належать процеси, що відбуваються у періодично діючих підігрівниках, наприклад, нагрівання повітря в регенераторах. До цієї групи належать також процеси нагрівання або охолодження огорожувальних конструкцій, споруд і будівель за умови періодичної зміни температури зовнішнього повітря [2].

Мета роботи — визначити темп охолодження/нагрівання дослідних рідин окремо для кожної термопари, розташованої на зонді на різній висоті, в умовах вимушеної конвекції.

Результати дослідження

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

Досліджувався розподіл температур уздовж теплообмінної поверхні за умови природної конвекції, гаряча рідина охолоджується, а холодна — нагрівається. Під час дослідження у внутрішню і зовнішню посудину експериментального стенду [3] занурено зонди з п'ятьма термопарами, які фіксують значення температури на різній висоті, а саме: 3, 27, 44, 64, 90 мм. Кожні 10 секунд інформація дослідів знімається та виводиться на комп'ютер за допомогою відповідної програми. За час проведення однієї серії дослідів фіксується 80...100 вимірювань. Оскільки температура з експериментального стенду фіксується за допомогою комп'ютера, то є можливість варіювати кількість точок в серії дослідів. Серія дослідів закінчується, коли температура гарячого і холодного теплоносіїв відрізняється не більше ніж на 5 °С [3]. Крива будується по точках однієї серії дослідів.

Вимірювання температур теплоносіїв здійснювалось у п'яти точках зовнішньої посудини об'ємом V_1 та у п'яти точках внутрішньої посудини об'ємом V_2 , рівномірно розподілених уздовж теплообмінної поверхні термометрами опору. Фіксування температур відбувається одночасно у десяти точках [3].

Експерименти проведено в умовах вимушеної конвекції. Експериментальна установка обладнана змінною пропелерною мішалкою ($d_m = 0,058$ м). Співвідношення діаметрів мішалки та внутрішньої робочої ємності $d_m/D_{вн} = 0,6$. V_1 — зовнішня робоча ємність, V_2 — внутрішня робоча ємність. Висота циліндричної теплообмінної поверхні $H = 0,108$ м. Діапазон регулювання частоти обертання мішалки 26...160 об/хв.

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 [4]

$$\text{Ln } \vartheta = -mt + C. \quad (1)$$

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

У проміжок часу, коли установлюється регулярний режим, темп охолодження не залежить ні від координат, ні від часу і є величиною сталою для всіх точок тіла. Темп охолодження, характеризує відносну швидкість зміни температури в тілі і залежить тільки від фізичних властивостей тіла, умов охолодження на його поверхні, геометричної форми та розмірів тіла [5].

В табл. 1—6 та на рис. 1—6 наведено експериментальні результати для води, соняшникової олії та цукрового розчину $c = 20\%$ під час нагрівання і охолодження, за умов розташування термопари на висоті 3, 27, 44, 64, 90 мм. Крива є апроксимацією дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції $\text{Ln } \vartheta = -mt + C$, де m — темп охолодження/нагрівання, C — коефіцієнт рівняння, R^2 — коефіцієнт детермінації. Отримана крива має лінійний характер, що відповідає регулярному тепловому режиму.

Таблиця 1

Нагрівання води

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопари h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = -mt + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	вода	90	$y = -0,0047x + 5,3707$	$R^2 = 0,945$
2	вода	64	$y = -0,0048x + 5,4701$	$R^2 = 0,9293$
3	вода	44	$y = -0,005x + 5,6104$	$R^2 = 0,9747$
4	вода	27	$y = -0,0042x + 5,4141$	$R^2 = 0,9416$
5	вода	3	$y = -0,0040x + 5,4376$	$R^2 = 0,9122$

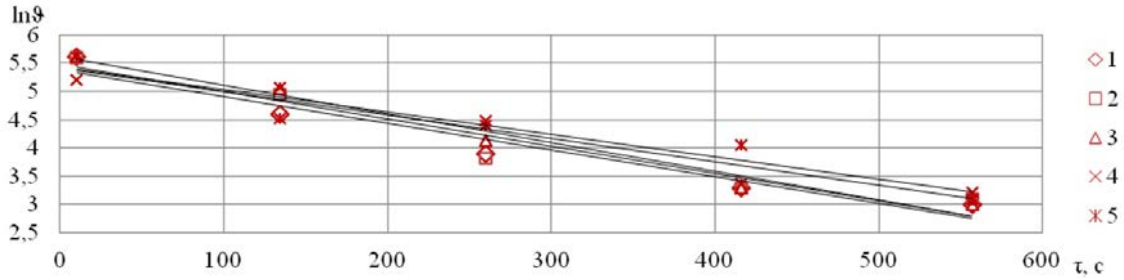


Рис. 1. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопари з середньооб'ємним значенням під час нагрівання води. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм, 2 — 27 мм, 3 — 44 мм, 4 — 64 мм, 5 — 90 мм

Таблиця 2

Охолодження води

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопари h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \theta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	вода	90	$y = -0,0038x + 5,453$	$R^2 = 0,9904$
2	вода	64	$y = -0,0047x + 5,4066$	$R^2 = 0,9949$
3	вода	44	$y = -0,0047x + 4,9494$	$R^2 = 0,9308$
4	вода	27	$y = -0,0076x + 5,1147$	$R^2 = 0,9945$
5	вода	3	$y = -0,0044x + 4,2501$	$R^2 = 0,968$

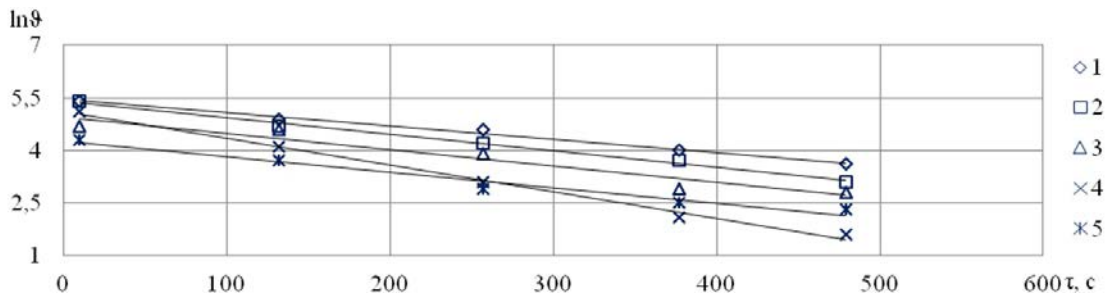


Рис. 2. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопари з середньооб'ємним значенням під час охолодження води. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм, 2 — 27 мм, 3 — 44 мм, 4 — 64 мм, 5 — 90 мм

Таблиця 3

Нагрівання соняшникової олії

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопари h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \theta = -m\tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	соняшникова олія	90	$y = -0,0035x + 6,4367$	$R^2 = 0,9852$
2	соняшникова олія	64	$y = -0,0033x + 6,2743$	$R^2 = 0,9611$
3	соняшникова олія	44	$y = -0,0037x + 6,1569$	$R^2 = 0,9689$
4	соняшникова олія	27	$y = -0,0029x + 5,5931$	$R^2 = 0,9678$
5	соняшникова олія	3	$y = -0,0026x + 6,0083$	$R^2 = 0,9931$

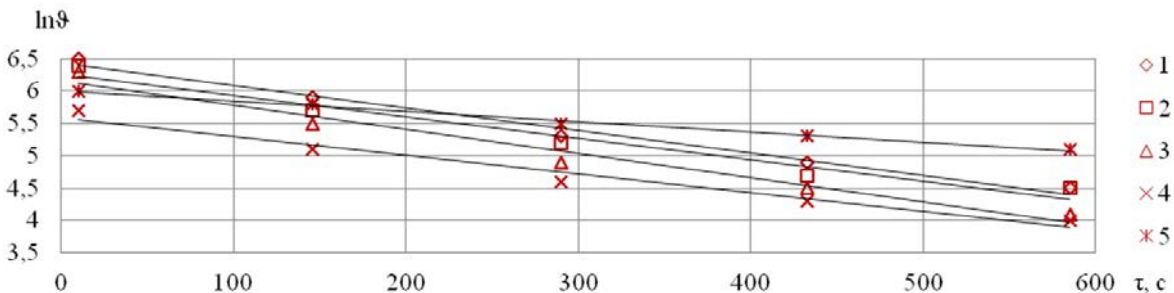


Рис. 3. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопари з середньооб'ємним значенням під час нагрівання соняшникової олії. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм, 2 — 27 мм, 3 — 44 мм, 4 — 64 мм, 5 — 90 мм

Охолодження соняшникової олії

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = -mt + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	соняшникова олія	90	$y = -0,0023x + 5,155$	$R^2 = 0,9874$
2	соняшникова олія	64	$y = -0,0025x + 5,1133$	$R^2 = 0,9495$
3	соняшникова олія	44	$y = -0,0020x + 4,9508$	$R^2 = 0,9735$
4	соняшникова олія	27	$y = -0,0021x + 4,9773$	$R^2 = 0,9313$
5	соняшникова олія	3	$y = -0,0021x + 4,3719$	$R^2 = 0,9474$

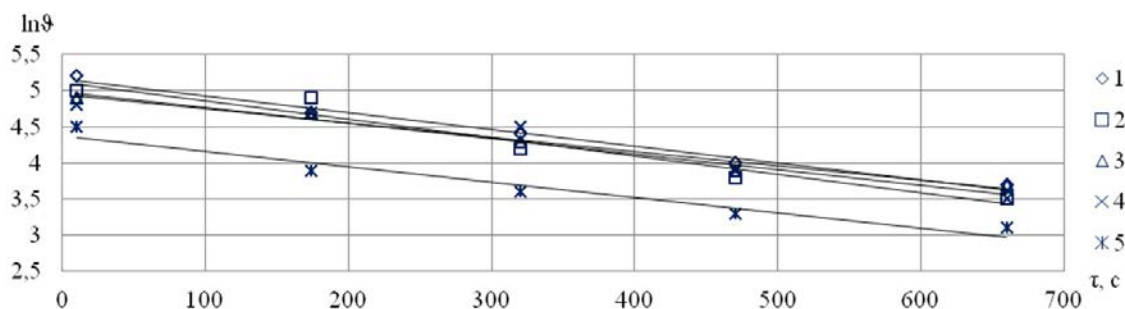
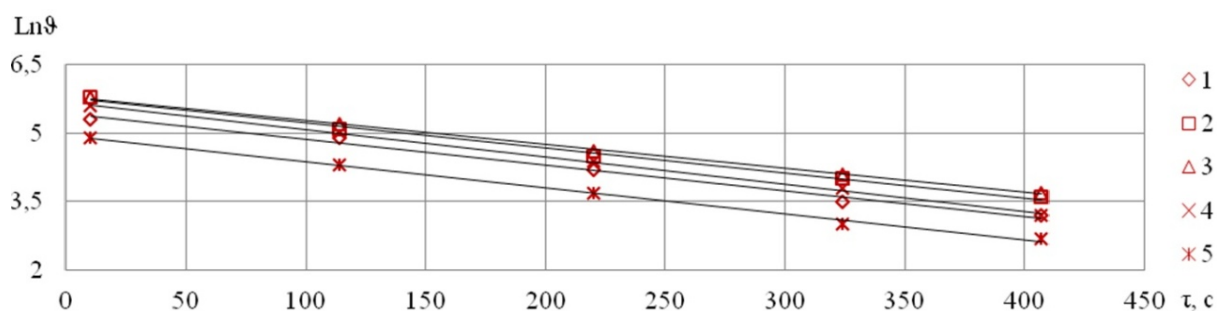


Рис. 4. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням під час охолодження соняшникової олії. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

Нагрівання цукрового розчину $c = 20\%$

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = -mt + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	цукровий розчин $c = 20\%$	90	$y = -0,0056x + 5,4217$	$R^2 = 0,9897$
2	цукровий розчин $c = 20\%$	64	$y = -0,0055x + 5,7802$	$R^2 = 0,9945$
3	цукровий розчин $c = 20\%$	44	$y = -0,0053x + 5,8166$	$R^2 = 0,998$
4	цукровий розчин $c = 20\%$	27	$y = -0,0060x + 5,6824$	$R^2 = 0,9981$
5	цукровий розчин $c = 20\%$	3	$y = -0,0057x + 4,9438$	$R^2 = 0,9953$

Рис. 5. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопар з середньооб'ємним значенням під час нагрівання цукрового розчину $c = 20\%$. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 ммОхолодження цукрового розчину $c = 20\%$

№	Дослідна рідина	Висота розташування термопар h , мм	Функція вигляду $\text{Ln } \vartheta = -mt + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	цукровий розчин $c = 20\%$	90	$y = -0,0081x + 6,4946$	$R^2 = 0,9798$
2	цукровий розчин $c = 20\%$	64	$y = -0,0085x + 6,2305$	$R^2 = 0,9952$
3	цукровий розчин $c = 20\%$	44	$y = -0,0088x + 5,8048$	$R^2 = 0,9410$
4	цукровий розчин $c = 20\%$	27	$y = -0,0090x + 5,2243$	$R^2 = 0,9665$
5	цукровий розчин $c = 20\%$	3	$y = -0,0083x + 5,1974$	$R^2 = 0,9571$

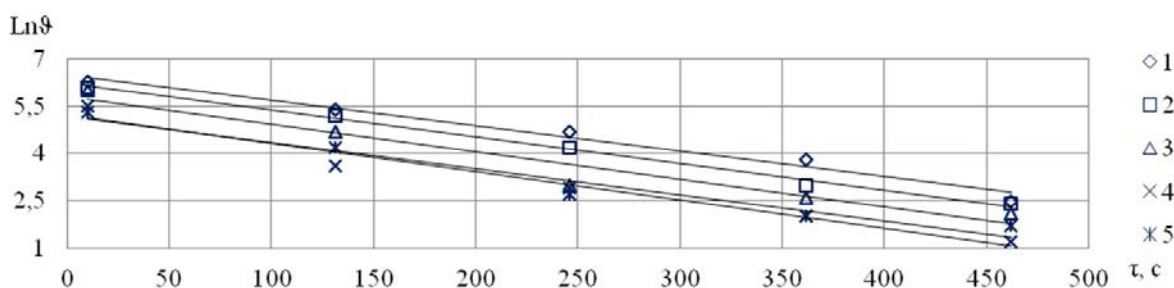


Рис. 6. Зіставлення значення надлишкової температури для кожної термопарі з середньооб'ємним значенням під час охолодження цукрового розчину $c = 20\%$. Розташування термопар по висоті: 1 — 3 мм; 2 — 27 мм; 3 — 44 мм; 4 — 64 мм; 5 — 90 мм

З рисунків і таблиць, де подані експериментальні результати дослідження темпу охолодження/нагрівання дослідних рідин окремо для п'яти термопар, розташованих на різній висоті експериментального зонду за умов вимушеної конвекції, очевидно, що натуральний логарифм надлишкової температури для всіх точок тіла змінюється в часі за лінійним законом, саме це характерно для регулярного теплового режиму для твердих тіл і системи з твердих тіл.

Величина m є додатною і має сталі значення, яке залежить від розмірів і форми тіла, значення теплових параметрів: коефіцієнта температуропровідності a , коефіцієнта теплопровідності λ , питомої теплоємності C_p , густини ρ та умов теплообміну — температури t_n і коефіцієнта тепловіддачі α .

Теорія регулярного режиму є підґрунтям простого і досить точного методу визначення теплофізичних коефіцієнтів речовини і коефіцієнта тепловіддачі. В основі цього методу лежать перша і друга теореми Г. М. Кондратьєва.

Висновки

1. Аналіз надлишкової температури, проведений окремо для кожної термопарі, розміщеної по висоті циліндричного об'єму, показує, що зберігається лінійність залежності $\text{Ln } \theta = f(\tau)$, при цьому проявляється вплив вимушеної конвекції на величину темпу охолодження/нагрівання m . Кількісне значення m залежить від висоти шару рідини, в якому вимірюється температура.

2. Представлені експериментальні результати дослідження темпу охолодження/нагрівання дослідних рідин окремо для п'яти термопар, розташованих на різній висоті експериментального зонду за умов вимушеної конвекції. Очевидно, що натуральний логарифм надлишкової температури для всіх точок тіла змінюється в часі за лінійним законом, саме це характерно для регулярного теплового режиму для твердих тіл і систем з твердих тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел, *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перер. и доп. М.: Энергия, 1975, 488 с.
- [2] С. Й. Ткаченко, і О. В. Власенко, «Дослідження темпу нагрівання гетерогенного рідкого середовища», *Сучасні технології матеріалів і конструкцій в будівництві*, наук.-техн. журн., № 1, с. 127-133, 2019.
- [3] С. Й. Ткаченко, і Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017. 148 с.
- [4] Г. М. Кондратьев, *Регулярный тепловой режим*. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1954, 408 с.
- [5] С. В. Юшко, О. Є. Борщ, і Г. І. Токар, *Нестационарна теплопровідність*, навч. посіб. Харків, Україна: НТУ «ХП», 2012, 112 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 31.10.2022

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

Власенко Ольга Володимирівна — науковий співробітник кафедри теплоенергетики, e-mail: olgakytsak7@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. Yo. Tkachenko¹
O. V. Vlasenko¹

Forced Convection — Study of the Regular Thermal Regime in Different Layers at the Liquid Height

¹Vinnitsia National Technical University

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

Research has been 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 regular mode of cooling (heating) of the object is characterized by a change in the temperature field over time, which is described by an exponential dependence, while the relative cooling rate t of all points of the body remains a constant value, independent of coordinates and time.

The theory of a regular thermal regime has been widely used to solve many practical problems: to determine the rate of cooling (heating) of a body, to study the thermophysical properties of materials, heat transfer and radiation coefficients, thermal resistance, etc. The advantages of this method are that the design of the device and the technique of conducting the experiment are simple, the accuracy of the obtained results is quite high, and the time of the experiment is short.

Non-stationary thermal conductivity corresponds to a thermal regime unstable in time, created by this or that thermal action on the body or environment. Non-stationary thermal conductivity is characterized by the fact that the temperature changes not only from point to point, but also over time. Non-stationary thermal conductivity occurs during heating or cooling of bodies, as well as when starting or stopping heat exchange devices, power units, etc.

The experimental results are presented on the study of the rate of cooling (heating) of experimental liquids separately for five thermocouples located at different heights of the experimental probe under conditions of forced convection.

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

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

Vlasenko Olha V. — Researcher of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: olgakysak7@gmail.com