

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; Д. І. Денесяк
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО
ТЕПЛООБМІНУ В СУМІШІ

Виконано експериментальні дослідження тепловіддачі від вертикальної циліндричної стінки до органічної суміші з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості. Для досліджень запропоновано портативний експериментальний стенд основна частина якого складається з двох коаксіальних циліндрів, термопар, пристрою збирання інформації з термопар та її передавання на ЕОМ. Коефіцієнти тепловіддачі від стінки до органічної суміші визначено двома методами: методом для стаціонарних процесів теплообміну та методом регулярного теплового режиму в системі «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка – суміш», за умов розміщення суміші у зовнішньому кільцевому каналі. Виявлено, що на дослідному проміжку витримується співвідношення для надлишкової температури $\ln(\theta) = f(\tau)$, яке характерне для регулярного теплового режиму у твердих тілах різної форми. Встановлено, що розбіжність коефіцієнтів тепловіддачі визначених методом регулярного теплового режиму і визначених методами стаціонарному режиму не перевищує 20%. Розбіжність пояснюється тим, що експериментальні дослідження проводилися за умов нестационарного теплообміну, а обробка дослідних даних для визначення коефіцієнтів тепловіддачі виконувалася за методикою, яка застосовується для стаціонарних режимів теплообміну. Отримані експериментальні дані підтверджують можливість використання методу регулярного теплового режиму для дослідження інтенсивності тепловіддачі до в'язких рідин та органічних сумішей. Запропонована лабораторна установка та методика обробки дослідів дозволяють оперативно оцінювати коефіцієнти тепловіддачі до в'язких рідини та сумішей з обмеженою інформацією про їх теплофізичні властивості та запропонувати методи інтенсифікації процесів конвективного теплообміну.

Ключові слова: нестационарний теплообмін, регулярний тепловий режим, теплообмін в органічних сумішах, темп охолодження, надлишкова температура.

Вступ

Експериментально-розрахунковий метод, який застосовується для визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах [1 – 3] потребує подальшого вдосконалення оскільки коефіцієнти тепловіддачі визначені на базовому портативному експериментальному стенді, де режим теплообміну нестационарний, одержували в результаті застосування методу обробки експериментів для стаціонарних (квазістаціонарних) умов теплообміну. Крім того, експериментально визначені значення коефіцієнтів тепловіддачі в нестационарних умовах теплообміну використовуються для прогнозування інтенсивності теплообміну в реальних теплообмінниках, які працюють в квазістаціонарних умовах теплообміну.

Охолодження та нагрівання тіл – це нестационарні процеси, які поширені в природі і техніці та досліджуються в теорії теплопровідності (регулярний тепловий режим) і теплопередачі. Теорія регулярного режиму для нестационарних процесів була розроблена в роботах Г. М. Кондратьєва, Г. Н. Дульнева та інших дослідників. Вона широко використовується в різних розрахунках і для проведення експериментальних досліджень.

Розрізняють регулярний режим першого, другого і третього роду. В залежності від чи $t_p = \text{const}$ або $t_p = \text{var}$ академік О. В. Ликов вводить загальну ознаку регуляризації кінетики нагрівання тіл для всіх трьох видів регулярних режимів. Цією ознакою є величина темпу охолодження, яка визначається за середньою об'ємною температурою тіла

$$m = - \frac{d\bar{t}}{(t_p - \bar{t})d\tau} = \text{const}$$

де t_p – температура навколишнього середовища, а τ – час.

З цієї точки зору немає необхідності розрізняти регулярні режими першого, другого і третього роду.

Ця робота ставить за мету застосувати метод регулярного теплового режиму для прогнозування інтенсивності теплообміну між металевою стінкою і сумішшю з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості в системі «циліндричний об’єм заповнений водою – металева циліндрична стінка – суміш в коаксіальному об’ємі».

Основна частина

Схеми дослідних установок показані в роботах [1 – 3]. Установки містять такі складові: циліндричну ємність з гарячим теплоносієм – водою висотою $h_m = 116$ мм, діаметром $d_m = 96$ мм і товщиною стінки $\delta_{cm} = 0,5$ мм та зовнішню ізольовану циліндричну ємність із холодним теплоносієм – сумішшю, яка утворює із внутрішньою ємністю кільцевий об’єм товщиною $\Delta = 52$ мм. Тонкостінна оболонка має незначний термічний опір $R_{cm} = 1,1 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт. Температури теплоносіїв вимірювались термопарами в трьох точках по висоті циліндричного об’єму і кільцевого каналу, а також лабораторним ртутним термометром (ціна поділки 0,1 °С) в центрі об’єму та каналу. Для виявлення характеру розподілу температур у воді і суміші під час проведення дослідів термопари переставляли по перерізу кільцевого каналу та циліндричного об’єму. На рис. 1. показані установка, схема розміщення термопар (а) та їх координати (б). Внутрішній циліндричний об’єм I заповнюється гарячою водою, кільцевий об’єм III – дослідною сумішшю. Інформація про теплофізичні властивості суміші обмежена. Відбувається природний нестационарний процес. Вода охолоджується, суміш нагрівається. Теплоота від води до суміші передається через тонку металеву циліндричну поверхню II. Кільцевий об’єм III утворений циліндричною стінкою II та ізольованою зовні циліндричною стінкою IV.

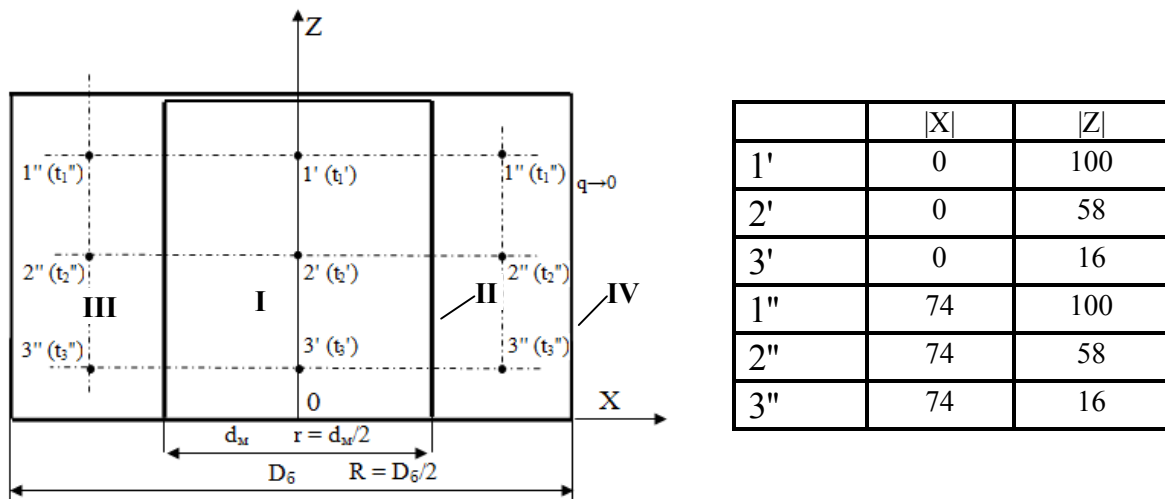


Рис. 1. Базовий елемент експериментальної установки

В кільцевий об’єм заливався холодний теплоносій – органічна суміш, в якій досліджувалась інтенсивність теплообміну. В якості дослідних сумішей використовувалися субстрати ВРХ з відносною вологістю $W = 86\%$, 90% та 94% . Діапазон температур гарячого теплоносія $t_2' = 72 \dots 50$ °С, холодного – $t_2'' = 20 \dots 40$ °С. Температура навколишнього середовища за межами системи $t_{н.с} = 20 \dots 22$ °С. Температури t_2' , t_2'' , температурний напір $\Delta t = t_2' - t_2''$ змінювалися за часом t_2' , t_2'' , $\Delta t = f(\tau)$. Також змінювався за часом тепловий потік від циліндричного об’єму до суміші $Q = f(\tau)$. За умов загального температурного

напору менше 5 °С досліди закінчували, оскільки обробка таких результатів недоцільна через велику похибку.

Температура стінки визначалася з рівняння $t_{cm} = t'_2 - \bar{q} / \bar{\alpha}_{1Nu}$ методом послідовних наближень, де $\bar{q}, \bar{\alpha}_{1Nu}$ – відповідно в моменти часу τ_2 і τ_1 , середній тепловий потік через металеву циліндричну стінку та коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки, який визначається за відомим критеріальним рівнянням для великого об'єму за умов стаціонарного режиму [4].

Питомий тепловий потік

$$\bar{q} = \frac{M_g \cdot C_{pg} \cdot [t'_{2(\tau_2)} - t'_{2(\tau_1)}]}{F(\tau_2 - \tau_1)}, \quad (1)$$

де M_g – маса води в циліндричному об'ємі, кг; C_{pg} – питома масова теплоємність для середньої температури, кДж/(кг·К); $t'_{2(\tau_1)}, t'_{2(\tau_2)}$ – температури води у початковий та кінцевий момент часу, °С, у періоди часу τ_1 і τ_2 , F – площа поверхні теплообміну, м².

Коефіцієнти тепловіддачі від стінки до органічної суміші α_2 визначались двома методами: методом для стаціонарних процесів теплообміну та методом регулярного теплового режиму в системі «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка – суміш», за умов розміщення суміші у зовнішньому кільцевому каналі.

До переваг регулярного теплового режиму відносять його універсальність. Він дозволяє робити експериментальні дослідження великої кількості різних фізичних параметрів: коефіцієнтів температуро- і теплопровідності, питомої теплоємності, теплового опору, коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнтів форми різних тіл. Всі методи регулярного режиму є такими, що самоконтролюються.

Методи регулярного режиму відзначаються простотою вимірювальної апаратури і проведенням дослідів. За умов їх використання основною вимірювальною величиною є темп охолодження. В досліді достатньо обмежитись закладанням одної термопари в довільному місці досліджуемого тіла. До недоліків регулярного режиму слід віднести необхідність ретельної реалізації теоретичних передумов про сталість температури середовища і коефіцієнта тепловіддачі до зовнішнього середовища α впродовж дослідів.

За результатами експерименту побудовано графік розподілу надлишкових температур в дослідній системі у вигляді залежності $\ln(t_2' - t_2'') = f(\tau)$ для $W = \text{const}$ (рис. 2), тобто

$$\ln(\vartheta) = \ln(t_2' - t_2'') = f(\tau), \quad (2)$$

де $\ln(\vartheta)$ – натуральний логарифм надлишкової температури органічної суміші, °С; τ – поточний час експерименту, с.

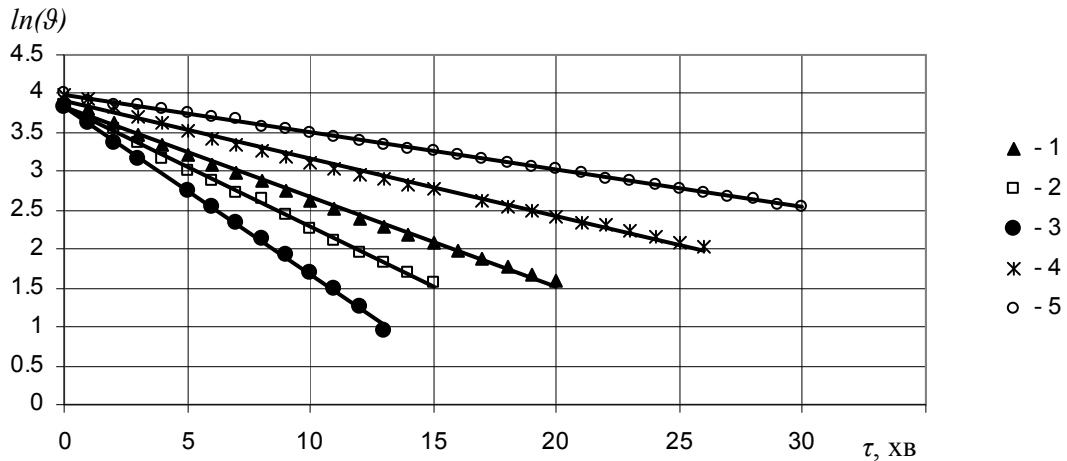


Рис. 2. Розподіл надлишкових температур за часом: субстрат свиней вологістю 1 – 86%, 2 – 90%, 3 – 94%, субстрат ВРХ 4 – 94%, 5 – 90%

На підставі рис. 2 виявлено, що залежність $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ для охолодження системи «циліндричний об’єм заповнений водою – металева стінка» має якісно однаковий характер з регулярним тепловим режимом, який спостерігається у твердих тілах різної форми [5, 6].

Темп регулярного охолодження системи m визначається з рівняння, °C/c

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \tag{3}$$

де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкові локальні температури тіла в початковий τ_1 та кінцевий τ_2 момент часу відповідно, $\vartheta = t'_2 - t_{cm}$, де t'_2, t_{cm} визначаються для двох моментів часу τ_1 і τ_2 .

Враховуючи експериментальні результати, які отримані за (2) і (3) визначимо коефіцієнти тепловіддачі з рівняння [5, 6]:

$$\alpha_{2m} = \frac{m \cdot C_p}{F \cdot \psi}, \tag{4}$$

де C_p – повна теплота тіла, кДж/К, F – площа поверхні циліндричного об’єму, м².

Коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі

$$\psi = \frac{\vartheta_f}{\vartheta_v} = \frac{m \cdot C_v}{\alpha_{2m} \cdot F}, \tag{5}$$

де ϑ_v – надлишкова температура гарячого теплоносія $\vartheta_v = t'_2 - t''_2$, °C; ϑ_f – надлишкова температура гарячого теплоносія по відношенню до середньої температури стінки $\vartheta_f = |t'_2 - t_{cm}|$.

$$\text{або } \psi = \frac{(t'_2 - t_{cm})}{(t'_2 - t''_2)}, \tag{6}$$

Визначимо коефіцієнти тепловіддачі до субстратів із співвідношення

$$\alpha_{2k} = \left(\frac{1}{k_{ексн}} - \frac{1}{\alpha_{1Nu}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

де $k_{екс} = q_{екс}/\Delta t_{екс}$, Вт/(м²·К) – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, який визначається як відношення питомого теплового потоку $q_{екс}$ до температурного напору $\Delta t_{екс} = t_2' - t_2''$.

За наведеними методиками здійснено дослідження та розрахунки інтенсивності тепловіддачі до субстратів свиней і ВРХ за умови вільної конвекції біля вертикальної циліндричної стінки. За результатами розрахунків побудовані залежності, які показані на рис. 3 та рис. 4, де індексом «m» і «k» позначені величини для різних методів визначення α_2 .

На рис. 3 показана залежність коефіцієнта тепловіддачі від темпу охолодження $\alpha_{2m} = f(m)$.

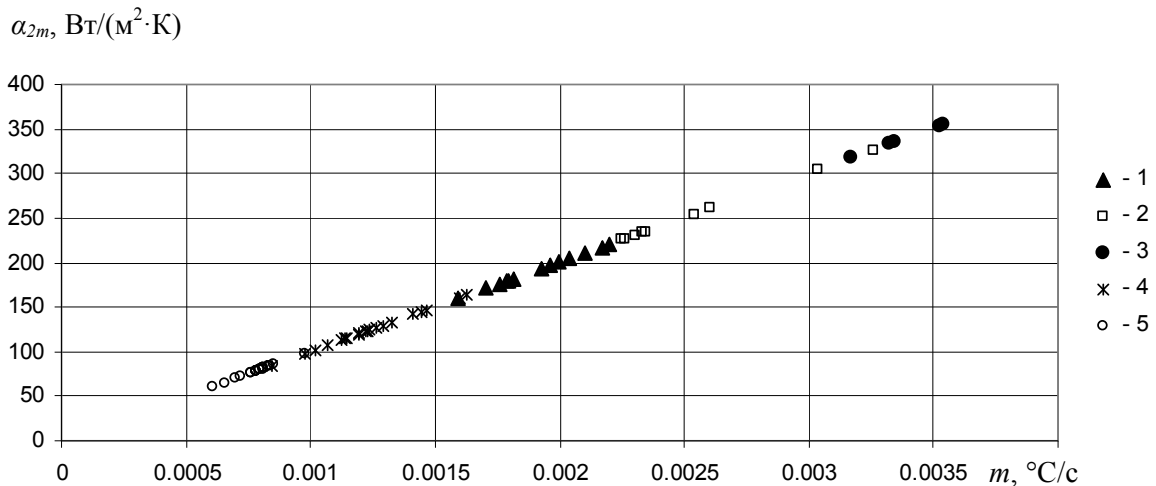


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тепловіддачі до субстратів від темпу охолодження: субстрат свиней вологістю 1 – 86%, 2 – 90%, 3 – 94%, субстрат ВРХ 4 – 94%, 5 – 90%

Отримані результати дають можливість побачити, що розташування експериментальних точок, відповідає якісній кривій, яка описана в [6, 7] для твердих тіл.

Нестационарні методи дозволяють уникнути вимірювань теплових потоків (в окремих випадках це складно) і обмежитись вимірюванням температур в двох або декількох точках. Вони дають змогу більш широкі можливості у відношенні вибору джерел теплоти, ніж стаціонарні, є, як правило швидкоплинними в часі, часто не потребують значного часу на попередню витримку зразків за визначеної температури.

Метод нестационарної теплопровідності дозволяє в ряді випадків проводити вимірювання за умов безперервної зміни температури до бажаного її значення. Це дозволяє отримати одразу відповідну безперервну криву зміни вимірювального теплового параметра в заданому інтервалі температур. В той же час у всіх стаціонарних методах такі криві будуються по декількох дослідних точках, які відповідають різним стаціонарним тепловим режимам, число яких звичайно обмежене. Останнє робить нестационарні методи такими, що мають перевагу за умов дослідження теплових процесів у складних сумішах [7, 8].

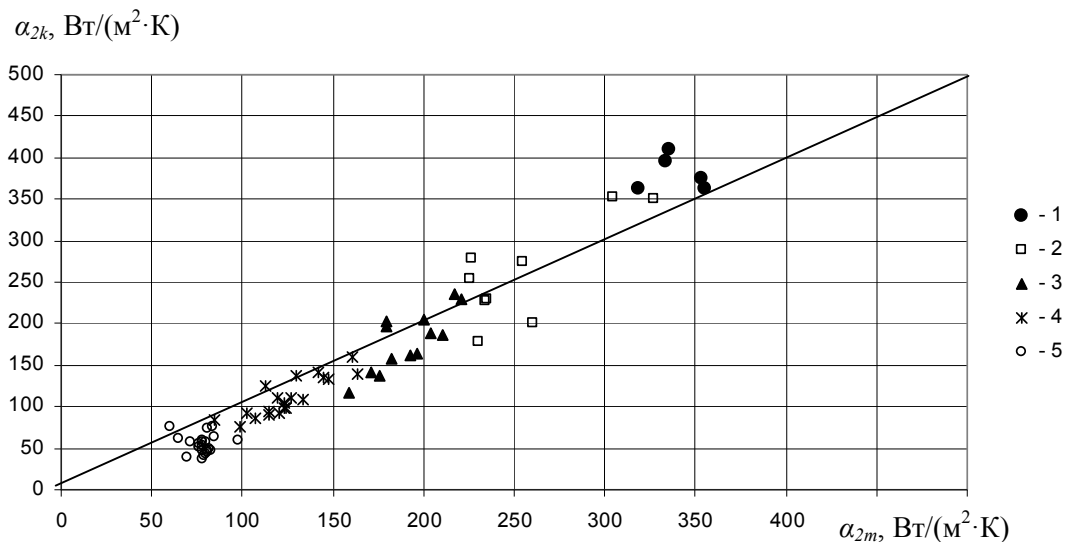


Рис. 4. Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі до субстратів визначених через темп охолодження α_{2m} і через коефіцієнт теплопередачі α_{2k} : субстрат свиней вологістю 1 – 86%, 2 – 90%, 3 – 94%, субстрат ВРХ 4 – 94%, 5 – 90%

Порівняння експериментальних результатів (рис. 4) дозволяє оцінити, що розбіжність коефіцієнтів тепловіддачі становить $\pm 20\%$. Це пояснюється тим що коефіцієнти тепловіддачі α_{2k} визначені за традиційною методикою, коли дослідження проводяться за усталеного режиму, а α_{2m} – за методикою, яка застосовується для нестационарних процесів.

Експерименти для виявлення регулярного теплового режиму проведені на установці схожій на установку (рис. 1), але геометричні розміри теплообмінної поверхні були іншими: висота $h_m = 88$ мм, діаметр $d_m = 72$ мм, товщина стінки $\delta_{cm} = 0,5$ мм, кільцевий канал товщиною $\Delta = 52$ мм; розміри зовнішньої ізолюваної циліндричної ємності $H_\sigma = 120$ мм, $D_\sigma = 200$ мм. При цьому виявлено, що в установці з такими геометричними параметрами також чітко проявляються ознаки регулярного теплового режиму.

Запропонована лабораторна установка та методика обробки дослідів дозволяють оперативно оцінювати коефіцієнти тепловіддачі до в'язких рідини та сумішей з обмеженою інформацією про їх теплофізичні властивості та запропонувати методи інтенсифікації процесів конвективного теплообміну.

Висновки

За результатами досліджень встановлено, що на дослідному проміжку параметрів витримується співвідношення для надлишкової температури $\ln(\vartheta) = f(\tau)$ для охолодження системи «циліндричний об'єм заповнений водою – металева стінка», яке характерне для регулярного теплового режиму у твердих тілах різної форми.

Залежності темпу охолодження $m = f(\alpha_2)$, які отримані експериментально, описуються кривою яка схожа за структурою до описаної в літературі для твердого тіла.

Отримані експериментальні дані підтверджують можливість використання методу регулярного теплового режиму для дослідження інтенсивності тепловіддачі до в'язких рідин та органічних сумішей, які зброджуються в реакторі біогазової установки. Використання методів регулярного теплового режиму є перспективним напрямком дослідження процесів теплообміну у в'язких рідинах із відомими теплофізичними властивостями та органічними сумішами з обмеженою інформацією про теплофізичні властивості.

Розбіжність коефіцієнтів тепловіддачі визначених методом регулярного теплового режиму

і визначених методами притаманними стаціонарному режиму не перевищує 20%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії [Електронний ресурс] / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – № 2. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/120/119>.
2. Ткаченко С. Й. Теплообмін в системах біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 124 с.
3. Ткаченко С. Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 124 с.
4. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
5. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М. : Энергоатомиздат, 1977 – 344 с.
7. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
8. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2018 р.

Стаття пройшла рецензування 16.03.2018 р.

Ткаченко Станіслав Йосипович – д. т. н., професор кафедри теплоенергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com.

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: rezidentnv1@ukr.net.

Денесяк Дмитро Іванович – аспірант кафедри теплоенергетики, e-mail: doc13energee@gmail.com.
Вінницький національний технічний університет.