

УДК 536.24

професорка **Ольга Черноусенко**,
chernousenko20a@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1427-8068,
асистентка **Ольга Власенко**,
olgakytsak7@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8975-0873,
Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»,
професор **Олександр Недбайло**,
nan_sashulya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8218-3933,
Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
професор **Станіслав Ткаченко**,
tkachenko@vntu.edu.ua, ORCID: ORCID 0000-0002-4654-2062,
Вінницький національний технічний університет

ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ В КРУГЛІЙ ТРУБІ ТЕПЛООБМІННИКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Проведено експеримент на портативній експериментальній установці для дослідження теплообміну модельних рідин і субстрату з наявної біогазової установки. Одержано масив експериментальних даних щодо коефіцієнта тепловіддачі модельних рідин і субстрату. Узагальнено результати дослідів щодо коефіцієнта тепловіддачі для модельних рідин. Одержано критеріальне рівняння теплообміну, що дозволяє розрахувати ці процеси. Висунуто гіпотезу, що це критеріальне рівняння теплообміну відповідає і субстрату. Для субстрату експериментально визначено густину, коефіцієнт температурного розширення, питому теплоємність, а також адитивно теплопровідність. З використанням критеріального рівняння теплообміну та визначених теплофізичних властивостей одержано в'язкість субстрату у відповідному діапазоні температури. За відомим критеріальним рівнянням теплообміну та визначеною в'язкістю отримано параметри інтенсивності теплообміну в круглій трубі теплообмінника біогазової установки.

Ключові слова: регулярний тепловий режим, субстрат, біогазова установка, теплофізичні властивості, експериментально-розрахунковий метод.

Вступ. Як відомо, при визначенні інтенсивності теплообміну потрібно врахувати площу поверхні теплообміну та властивості середовища, в якому передається теплота. Рекуперативні теплообмінники, що мають у своїй конструкції круглі труби, набули широкого застосування у різних промислових технологіях.

Біогазові технології передбачають велике за обсягом виробництво. В них застосовуються значні об'єми субстрату, теплофізичні властивості (ТФВ) якого, зазвичай, невідомі.

Останні дослідження та публікації. На сучасному етапі розвитку біогазових технологій виникають проблеми щодо термостабілізації процесів і прогнозуванню параметрів інтенсивності теплообміну [1 - 7]. На виробництві велика увага приділяється проблемам створення усталеного теплового режиму біореактору за умови зміни температури навколишнього середовища. Основним чинником для ефективного функціонування біореактору є дотримання в середині температури субстрату у визначеному діапазоні [8 - 15]. Процеси тепломасопереносу при отриманні біогазу недостатньо досліджені, адже склад субстрату є різноманітним. До того ж він є водночас багатофазним та багатокомпонентним середовищем [16 - 24]. Загально відомі методи прогнозування інтенсивності теплообміну в даному випадку не підходять і потребують оригінального специфічного підходу.

З інформаційних джерел [24, 25] відома широковживана методика розрахунку параметрів теплообмінника із використанням результатів аналізу регулярного теплового режиму (РТР) в системі «рідина - тверде тіло» за критеріальними рівняннями теплообміну для рідин із відомими ТФВ.

За умови наявності обмежених даних щодо ТФВ рідин запропоновано експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) для прогнозування значень параметрів інтенсивності теплообміну в таких середовищах. За попереднім досвідом ЕРМ ґрунтується на теорії подібності з дослідженнями лише параметрів окремих компонентів, з яких складаються субстрати [25].

Метою роботи є розроблення надійного методу прогнозування інтенсивності теплообміну в круглій трубі натурного теплообмінника в різних технологічних режимах, що мають місце в біогазових технологіях (із використанням критеріальних рівнянь теплообміну, але з обмеженою інформацією щодо ТФВ субстрату).

Матеріали і методи досліджень. У представлений роботі використовується удосконалений ЕРМ (рис. 1), що базується на сумісному використанні теорії подібності та аналізі параметрів регулярного теплового режиму. Під час проведення досліджень був використаний реальний субстрат з діючої біогазової установки (БГУ).

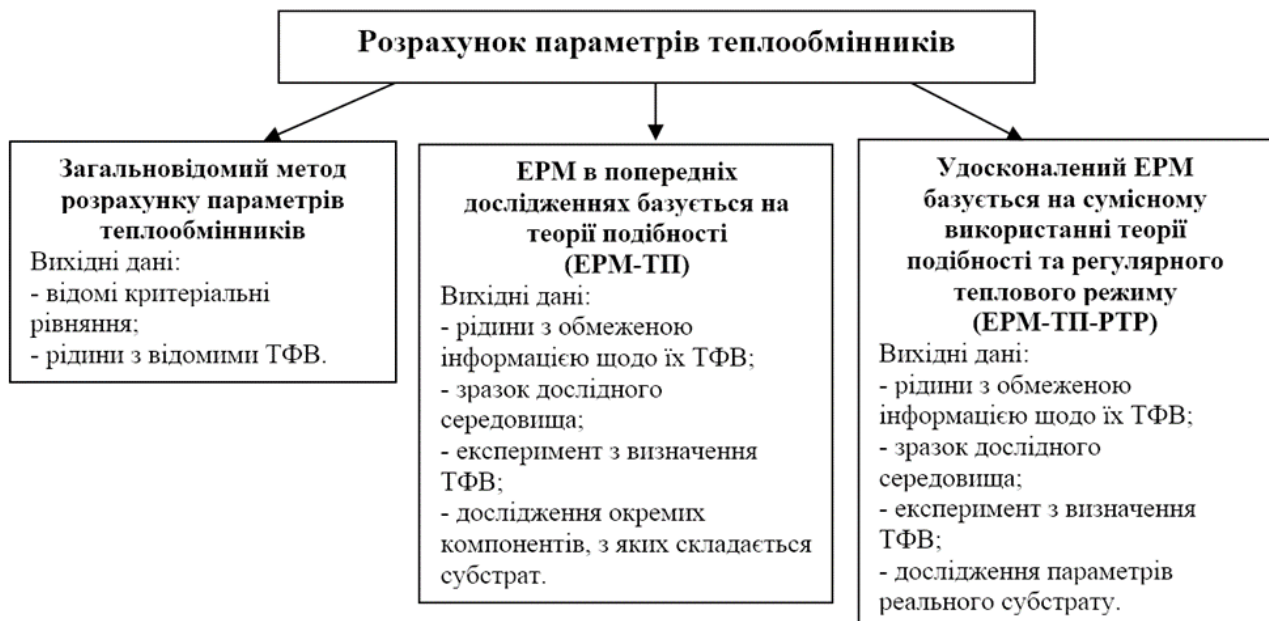


Рис. 1. Характеристики основних методів розрахунку параметрів рекуперативних теплообмінників

Причиною високої інтенсивності теплообміну є безпосередній контакт речовин на граничних поверхнях фаз, що повинен підтримуватися безперервним оновленням цих поверхонь завдяки постійному перемішуванню субстрату. Однак такий процес можна реалізувати тільки в тому випадку, коли в'язкість субстрату дозволяє рівномірне перемішування рідини, зважених твердих частинок, а також бактерій та бульбашок механічної суміші газів. Верхня межа концентрації твердих частинок, за якої ще можливе вільне перемішування фаз, для субстрату з дрібнодисперсною суспензією твердих речовин відповідає 10...12%. За більших значень вихід газу значно зменшується. Шляхом інтенсивного перемішування та відповідного підведення теплоти вплив небажаного ефекту можна суттєво зменшити. Для цього потрібно обмежити швидкість руху субстрату в діапазоні $0,5 \leq w \leq 0,6$ м/с та нагрівання (охолодження) в діапазоні $\Delta T \pm 1,5^\circ\text{C}$ [26 - 27].

Пропонується наступний алгоритм визначення в'язкості субстрату:

- проводяться експериментальні дослідження теплообміну;
- аналізуються параметри субстрату з обмеженою інформацією щодо його ТФВ та рідини з відомою інформацією по ТФВ;
- визначаються параметри РТР в системі «рідина - тверде тіло»;
- визначається темп охолодження (нагрівання) субстрату та аналогічних відомих рідин;
- за темпом охолодження (нагрівання) субстрату підбирається модельна рідина;

- користуючись ознаками РТР, визначаються значення параметрів інтенсивності теплообміну в середовищах, що досліджуються;
- з наявного масиву експериментальних даних виводиться критеріальне рівняння для параметрів модельної рідини із припущенням, що параметри субстрату йому також відповідають;
- виділяються комплекси фізичних величин (КВФ), що складаються із основних теплофізичних властивостей;
- доступними методами визначається густина ρ , температурний коефіцієнт розширення β , питома масова теплоємність C_p ; а також, за адитивними властивостями, теплопровідність λ субстрату.
- визначається в'язкість в діапазоні зміни значень температури біотехнологічного процесу.

Експериментальні дослідження проводились в термодинамічній системі «навколишнє середовище I – тіло II», де «навколишнє середовище I» – вода, а «тіло II» – рідинне середовище (субстрат) в тонкій металевій циліндричній оболонці в умовах вимушеної конвекції (використання перемішуючого пристрою з діаметром пропелера 0,08 м та частотою обертання, що могла змінюватись межах 32 - 160 об./хв.).

Схема експериментального стенду [28, 29] показана на рис. 2.

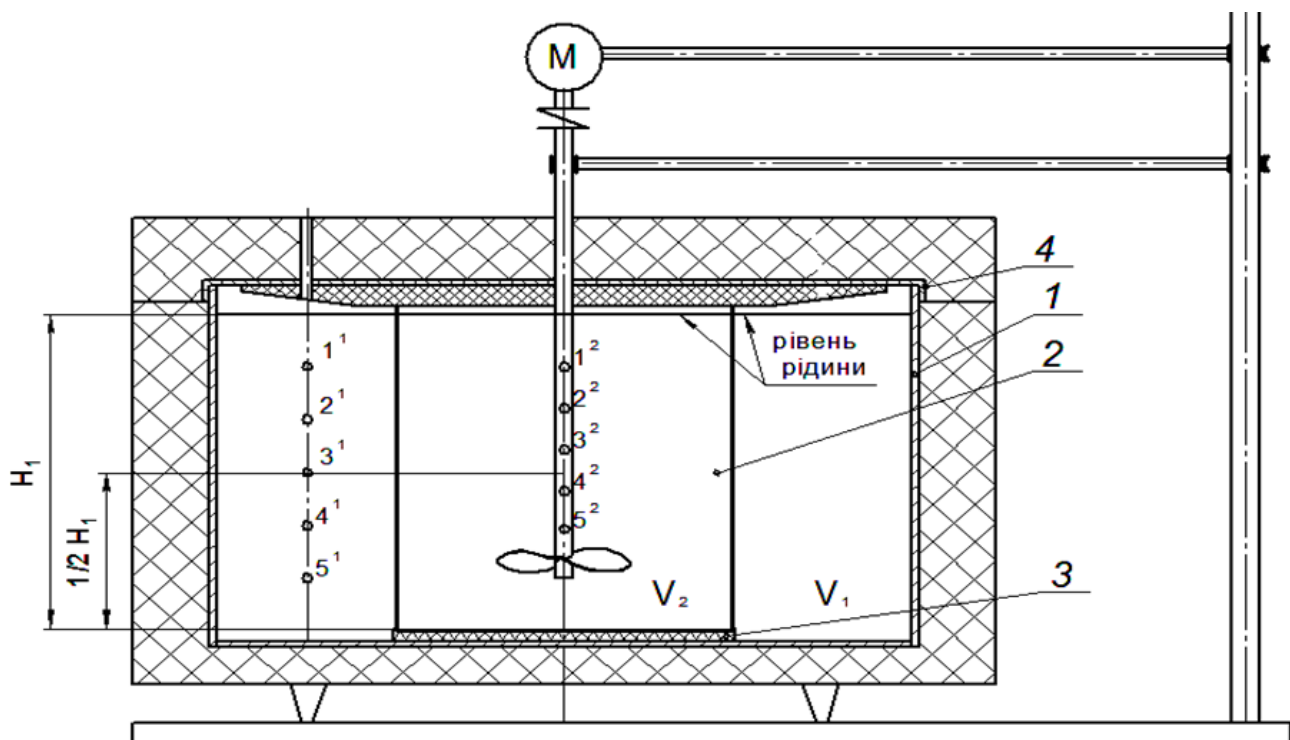


Рис. 2. Схема експериментального стенду:

1 – зовнішня посуда; 2 – внутрішня посуда; 3 – теплоізоляційна підставка; 4 – кришка; $1^1...5^1$, $1^2...5^2$ – місця вимірювання значень температури, відповідно, у зовнішній та внутрішній посудинах

На прикладі нагрівання субстрату проведення експерименту здійснювалось наступним чином. У зовнішню посудину 1 заливається гаряча вода, у внутрішню 2 – дослідна рідина. Після чого внутрішня посудина розміщується в зовнішній із додатковими діями щодо досягнення однаковості рівня рідин. Установка закривається кришкою 4. При цьому оболонка експериментальної установки теплоізолювана ззовні від довкілля (в т.ч. окремо має місце теплоізоляційна підставка 3, що розділяє днища посудин). Надалі, за допомогою термоелектричних перетворювачів, здійснюється вимірювання значень температури у зовнішньому та внутрішньому об'ємах через визначений проміжок часу. Дослід закінчується після зрівняння значень в межах $3...5^{\circ}\text{C}$. Фіксування дослідних даних відбувається одночасно в десяти місцях по середині кожного з утворених об'ємів із автоматичним записом на портативному комп'ютері.

Результати досліджень отримані для цукрових розчинів із концентрацією $C = 50; 60\%$ при значеннях частоти обертання пропелерної мішалки 26; 34; 54; 114; 154 об./хв., яким відповідають характерні лінійні швидкості на крайній точці пропелера $w = 0,11; 0,14; 0,23; 0,48; 0,65$ м/с (рис. 3). Тут характерна швидкість $\bar{w} = \pi \cdot n \cdot d_m / 60$, м/с; де n – частота обертання ротора мішалки, об./хв.; $d_m = 0,08$ м – діаметр пропелера. В розрахунках прийнято, що характерна швидкість руху рідини дорівнює половині значення лінійної швидкості руху крайньої точки пропелера мішалки $w_{\max}$.

Встановлено, що в термодинамічній системі «навколишнє середовище I – тіло II» мають місце ознаки регулярного теплового режиму. Про це свідчить сталість темпу охолодження (нагрівання) в досліджуваному рідинному середовищі [30] $m = (\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2) / (\tau_1 - \tau_2) = \text{const}$, де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища в циліндричній посудині зі сторони води відповідно в моменти часу τ_1 і τ_2 , $\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$, $^{\circ}\text{C}$.

Криві (рис. 3) представляють результати апроксимації залежності логарифму надлишкової осередненої температури дослідної рідини у внутрішній посудині від часу $\ln \vartheta = m \cdot \tau + C$, де m – темп охолодження (нагрівання), C – константа.

У світовому досвіді наявне вивчення теплообміну з потоками рідких суспензій. Опр та інші для різних суспензій, з похибкою $\pm 20\%$ при $\eta_{\text{п}} = \eta \cdot (1 - \beta/\beta_0)^{-1,8}$, де η – в'язкість, отримали

$$\text{Nu}_{\text{п}} = 0,027 \cdot \text{Re}_{\text{п}}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot (\eta/\eta_{\text{п}})^{0,14}. \quad (1)$$

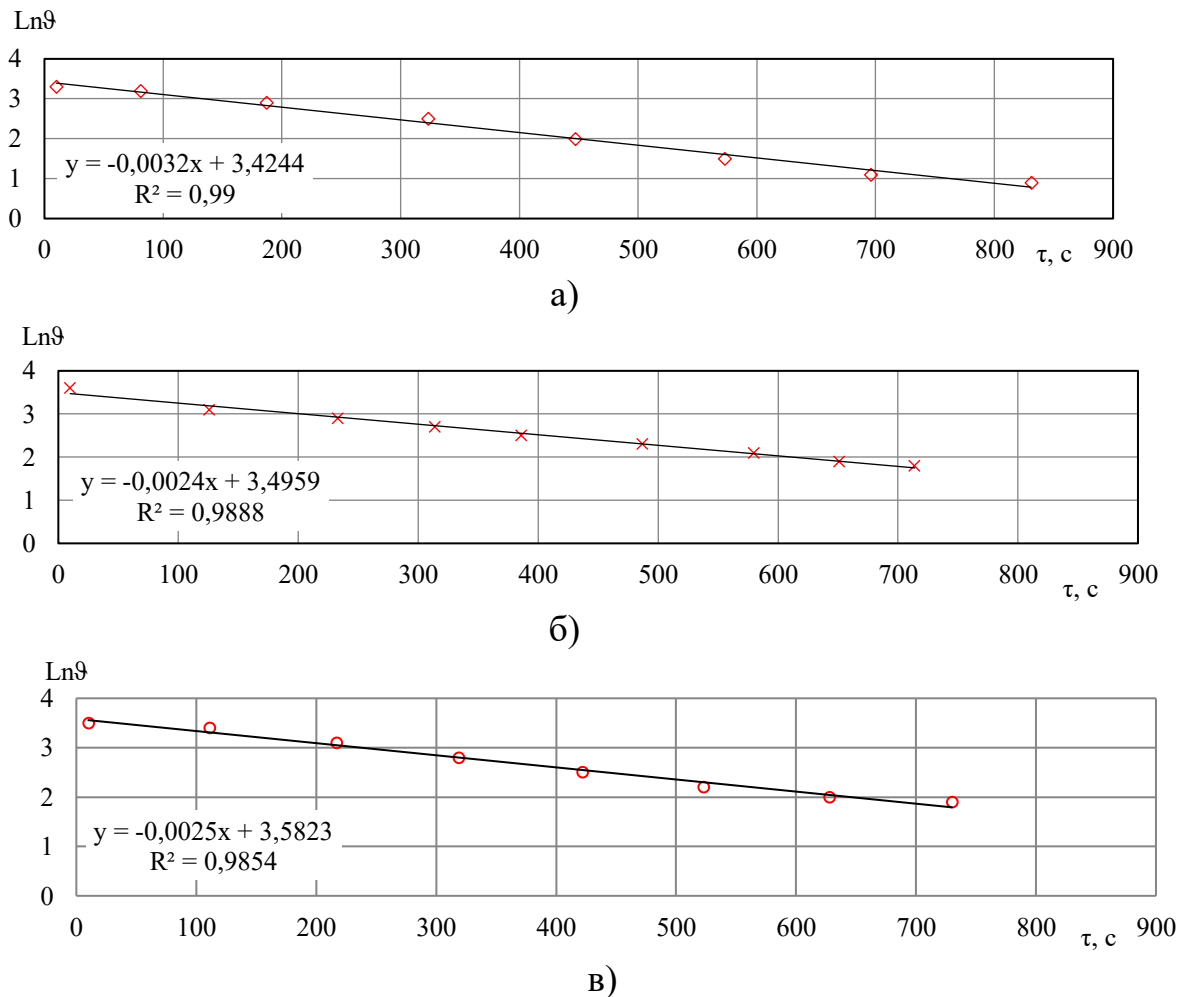


Рис. 3. Зміна надлишкової температури з часом в умовах нагрівання цукрового розчину з концентрацією $C = 60\%$ при значеннях швидкості w , м/с: а) 0,22; б) 0,28; в) 0,45

З використанням програми Statistica виводиться критеріальне рівняння (2) для модельних рідин, що описує теплообмін (рис. 4) у тонкостінному металевому циліндрі

$$Nu_2 = 0,0387 \cdot Re^{0,625} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot (\eta/\eta_n)^{0,14}, \quad (2)$$

що достовірне в межах $100 < Re < 14000$, $25 < Pr < 250$, де Nu_2 – число Нуссельта; $Re = w \cdot H / \nu$ – число Рейнольдса; $Pr_p = \nu / a$ – число Прандтля для середньооб'ємної температури рідинного середовища; ν – кінематична в'язкість рідинного середовища, m^2/s ; a – коефіцієнт температуропровідності, m^2/s ; H – визначальний лінійний розмір, м.

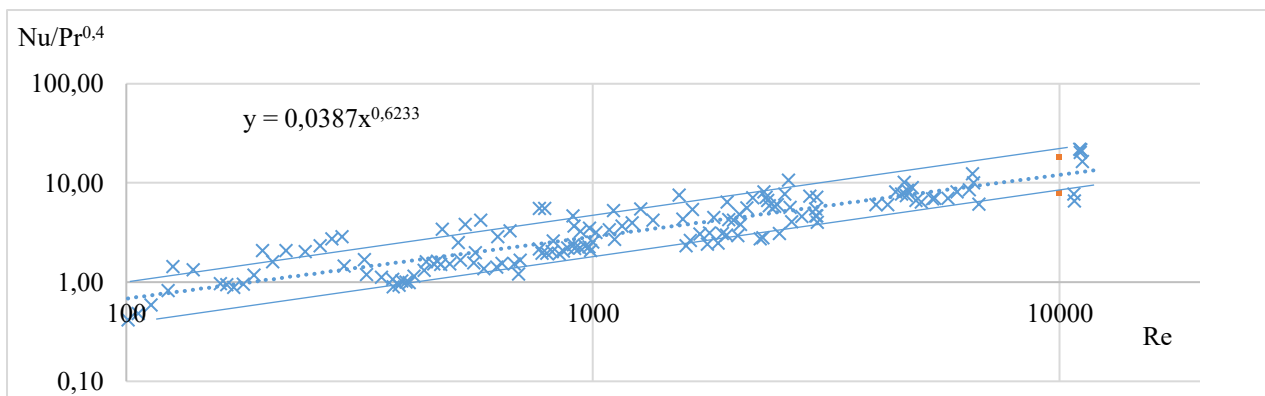


Рис. 4. Узагальнення результатів експериментів

При обробленні експериментальних даних поправка на неізотермічність $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ оцінюється в межах 0,97 – 1,04, тому при отриманні критеріального рівняння не була використана.

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння (2) приймає вигляд

$$\bar{\alpha}_2^{PTP} = 0,0387 \cdot \bar{w}^{0,62} \cdot l^{-0,38} \cdot \text{КФВ}_{(-v)} \cdot \nu^{-0,22}, \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}_2^{PTP}$ – коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра і дослідним рідинним середовищем, що визначений методом РТР [30];

$\bar{w}$ – характерна швидкість на крайній точці пропелера, м/с;

$l = 0,08$ м – діаметр мішалки;

$\text{КФВ}_{(-v)}$ – комплекс фізичних властивостей без врахування кінематичної в'язкості ν_2 дослідного рідинного середовища,

β_2 – коефіцієнт температурного розширення, K^{-1} ;

ρ_2 – густина, $кг/м^3$;

C_{p2} – питома теплоємність, $Дж/(кг \cdot K)$;

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot K)$.

Згідно реструктуризованого рівняння (3) параметр $\nu^{-0,22}$ характеризує вплив в'язкості на коефіцієнт тепловіддачі α_2 .

Комплекс фізичних властивостей КФВ

$$\text{КФВ} = \rho_2^{0,4} \cdot C_{p2}^{0,4} \cdot \lambda_2^{0,6} \cdot \nu^{-0,22}. \quad (4)$$

Відомо існування РТР в твердому тілі та в термодинамічній системі твердих тіл. Нами вперше встановлено існування РТР в системі «субстрат - тверде тіло» під час його охолодження (нагрівання) в умовах вільної та

вимушеної конвекції. Завдяки чому коефіцієнт тепловіддачі визначений методом РТР [30].

Коефіцієнт тепловіддачі за умов РТР

$$\bar{\alpha}_2^{\text{РТР}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{F\psi}{mC_{p1}}}, \quad (5)$$

де ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі;

$k_{\text{експ}}$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

F – площа поверхні теплообміну тонкостінного металевого циліндра, м².

На рис. 6 і 7 наводиться порівняння в'язкісних параметрів, відповідно, що визначені експериментально $\nu_{\text{експ}}^{-0,22}$ для цукрового розчину з концентрацією $C = 50\%$ і $C = 60\%$ та табличного $\nu_{\text{табл}}^{-0,22}$ з [31] при різній частоті обертання ротора пропелерної мішалки.

За різної частоти в'язкісний параметр має бути однаковим, що видно з рис. 8.

Якщо в'язкісний параметр субстрату, за умови різної частоти, буде мати розбіжність не більше $\pm 40\%$, то у відповідності до вищенаведеного алгоритму, він може бути використаний для методологічного переходу до в'язкісного параметру в круглій трубі:

- визначається число Рейнольдса в трубі теплообмінника;
- згідно визначеного режиму руху в трубі з довідникових джерел підбирається критеріальне рівняння;
- користуючись теплофізичними властивостями, що знайдені за допомогою ЕРМ, визначаються параметри інтенсивності теплообміну в трубі теплообмінника біогазового реактора.

Для прикладу, нижче розрахована інтенсивність теплообміну в круглій трубі теплообмінника біогазової установки. Приймається перехідний режим течії в круглій трубі. З літературних джерел критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі в прямих трубах в перехідній області течії рідини ($2300 < Re < 10000$)

$$\overline{Nu}_2 = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr_p^{0,43}. \quad (6)$$

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння (6) набуває вигляду

$$\bar{\alpha}_2 = 0,008 \cdot \bar{w}^{0,9} \cdot l^{-0,1} \cdot \rho_2^{0,43} \cdot C_{p2}^{0,43} \cdot \lambda_2^{0,57} \nu^{-0,47}. \quad (7)$$

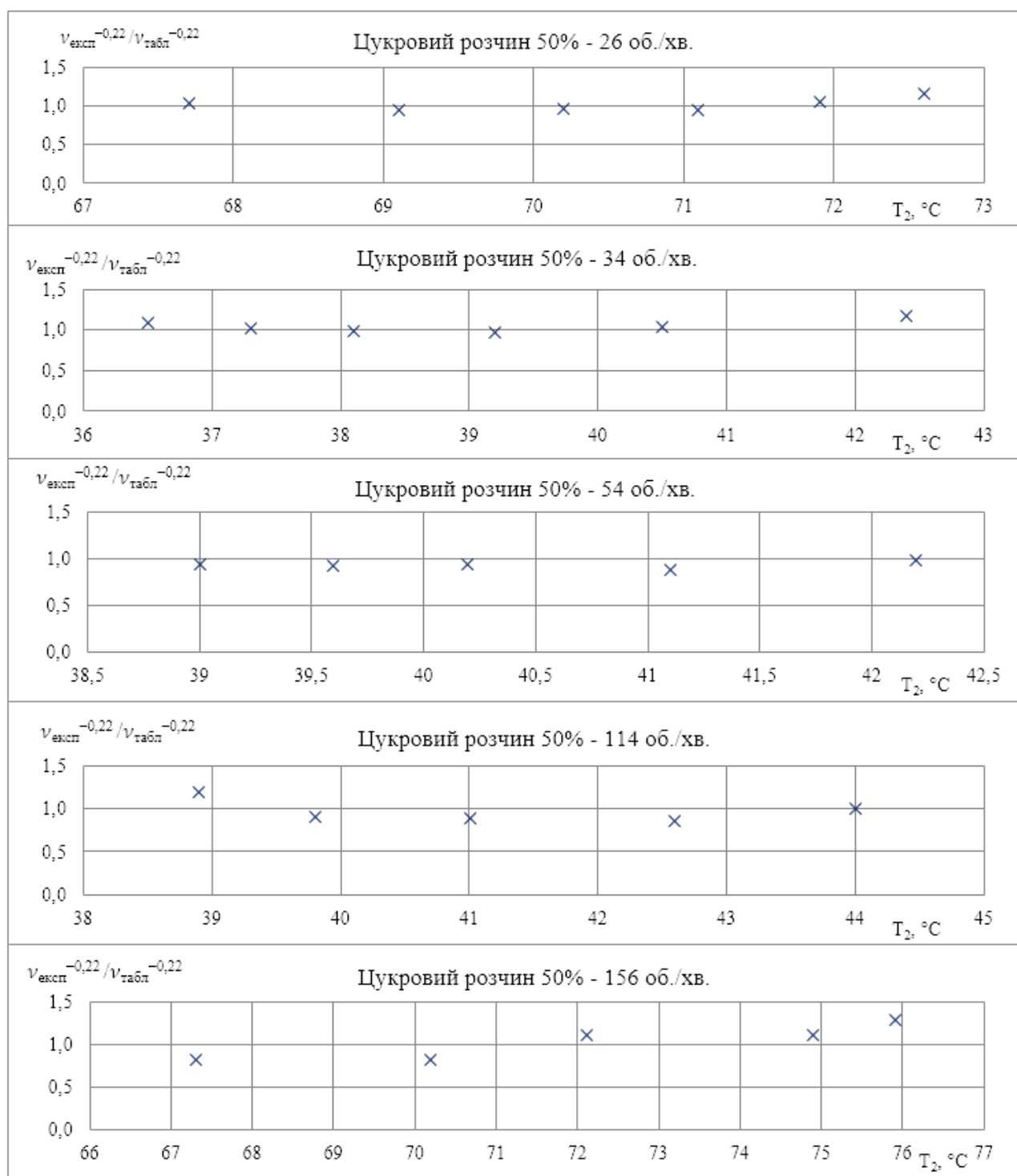


Рис. 6. Зіставлення відношення в'язкісних показників $\nu_{\text{експ}}^{-0,22} / \nu_{\text{табл}}^{-0,22}$ в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції для цукрового розчину з концентрацією $C = 50 \%$

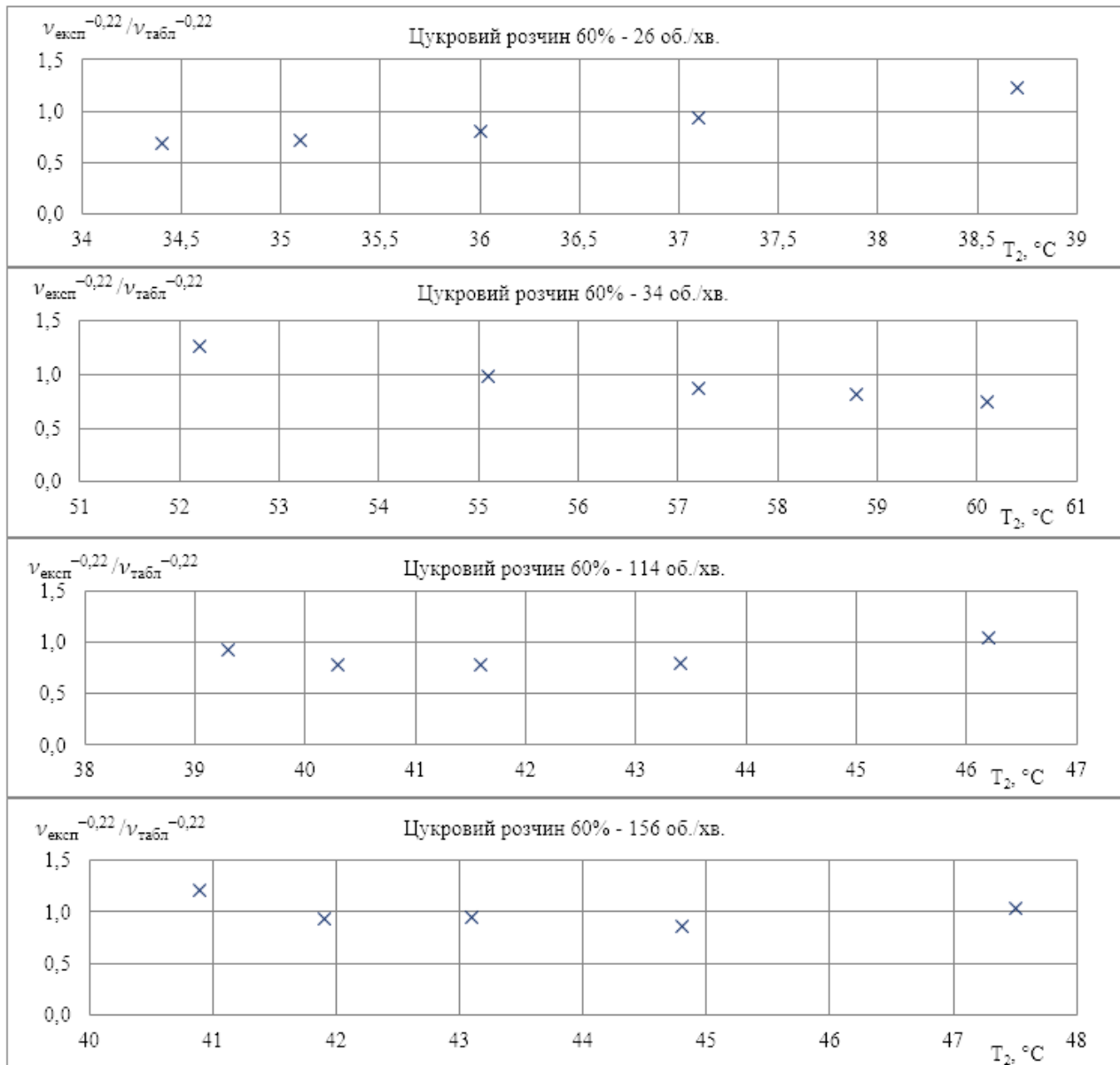


Рис. 7. Зіставлення відношення в'язкісних показників $\nu_{\text{експ}}^{-0,22} / \nu_{\text{табл}}^{-0,22}$ в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції для цукрового розчину з концентрацією $C = 60\%$.

До розрахунків приймалась сталевая труба з діаметрами (внутрішній/зовнішній) 50/57 мм та заданою швидкістю течії рідинного середовища в середині 0,4 – 0,6 м/с.

Прогнозований коефіцієнт тепловіддачі (рис. 9) в круглій трубі для субстрату складає при цьому 1000 – 2100 Вт/(м²·К). Умовою визначення коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2T}$ є швидкість руху субстрату не більше 0,6 м/с задля запобігання порушенню біотехнологічних процесів [33, 33].

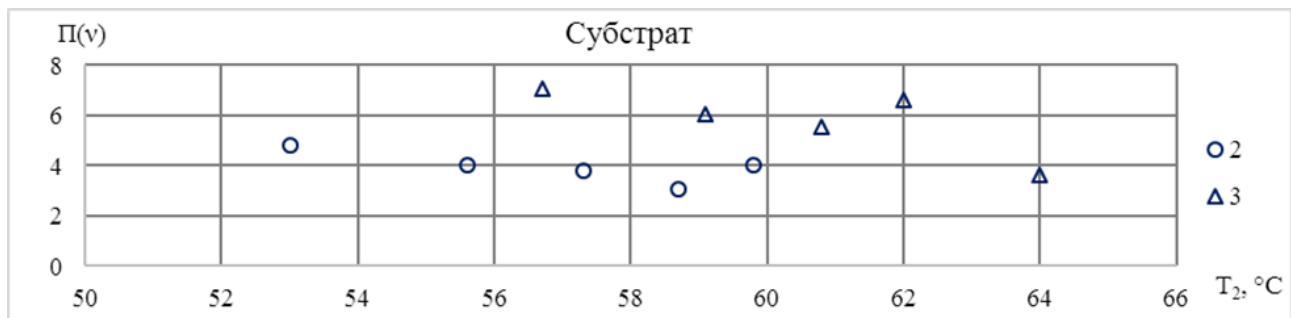


Рис. 8. В'язкісний параметр субстрату в залежності від температури з частотою обертання пропелерної мішалки n , об./хв.:
2 – 114; 3 – 156.

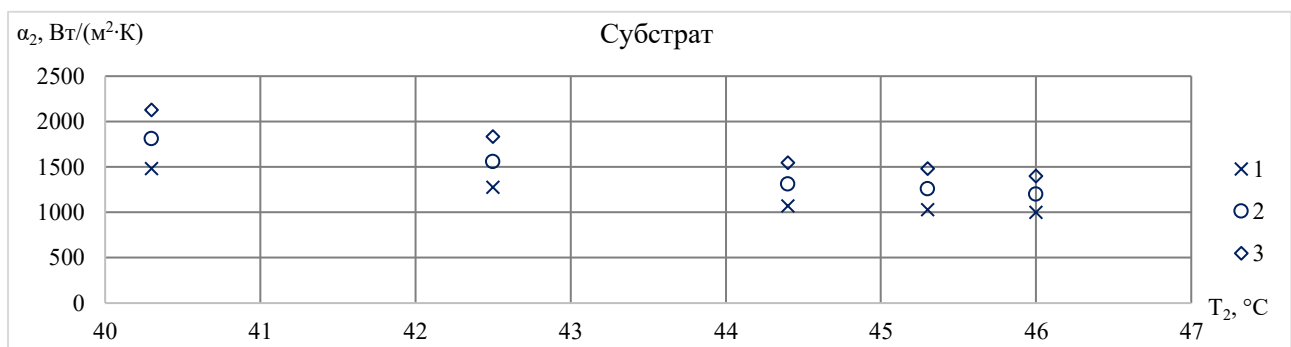


Рис. 9. Значення коефіцієнту тепловіддачі в круглій трубі в умовах нагрівання рідинного середовища при швидкості течії w , м/с:
1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6.

При визначенні α_2 методом РТР використовуються темп охолодження (нагрівання) m і коефіцієнт нерівномірного розподілу температур ψ , що розраховані для всього процесу теплообміну коли високі різниці температур ΔT . При цьому відсутня потреба у використанні методів послідовних наближень (при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі α_1), що підвищує вірогідність визначення коефіцієнта тепловіддачі α_2 .

Висновки. Використання запропонованого ЕРМ надає можливість в умовах обмеженої інформації щодо теплофізичних та реологічних властивостей рідинного середовища спрогнозувати параметри інтенсивності теплообміну в трубі теплообмінника, що використовується в біогазових технологіях.

References

1. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Y. Prospects of biomethane production and use in Ukraine. UABio Position Paper. 2014. № 11.
2. Heletukha H., Kucheruk P., Matvieiev Yu. Perspektyvy vyrobnytstva ta vykorystannia biohazu v Ukraini: Analitychna zapyska. № 11. Kyiv, Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy, 2014. 42 s.
3. Zema D., Fòlino A., Zappia G., Calabrò P., Tamburino V., Zimbone S. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: An environmentally sound way of citrus waste management in agro-ecosystems. Science of The Total Environment. 2018.
4. Ecem Oner B., Akyol C., Bozan M., Ince O., Aydin S., Ince B. Bioaugmentation with *Clostridium thermocellum* to enhance the anaerobic biodegradation of lignocellulosic agricultural residues. Bioresour Technol. 2018.
5. Lindmark J., Thorin E., Bel Fdhila R., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014.
6. Tian L., Zou D., Yuan H., Wang L., Zhang X., Li X. Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion. Bioresour Technol, 2015. P. 1 - 7.
7. Klingenberg D., Root T., Burlawar S., Scott C., Bourne K., Gleisner R., et al. Rheometry of coarse biomass at high temperature and pressure. Biomass and Bioenergy, 2017; 99:69-78.
8. Kress P., Nagele H., Oechsner H., Ruile S. Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. Bioresour Technol. 2018. P. 1 - 6.
9. Chen J, Wu J, Ji X, Lu X, Wang C. Mechanism of waste-heat recovery from slurry by scraped-surface heat exchanger. Applied Energy. 2017. P. 146 - 155.
10. Li Y, Xu F, Li Y, Lu J, Li S, Shah A, et al. Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues. Waste Manag. 2018.
11. El-Mashad H.M., van Loon W.K., Zeeman G., Bot G.P. Rheological properties of dairy cattle manure. Bioresour Technol. 2005.
12. Achkari-Begdouri A. Rheological Properties of Moroccan Dairy Cattle Manure. Bioresour Technol. 1992.
13. Achkari-Begdouri A., Goodrich P. Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure. Bioresource Technology. 1992. P. 149 - 156.
14. Tian L., Shen F., Yuan H., et al. Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion. Bioresource Technology. 2014. P. 86 - 91.

15. Viamajala S., Mcmillan J.D., Schell D.J., et al. Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size. *Bioresource Technology*. 2009.
16. Heletukha H., Kucheruk P., Matveev Yu., Khodakovskaia T. Perspektivy proyzvodstva biyohaza v Ukrainy. *Vozobnovliaemaia enerhetyka*. 2011. №3. S.73 – 77.
17. Müller C. Anaerobic digestion of biodegradable solid waste in low-and middle-income countries. *Sandec report*. 2007. P. 7.
18. Biogas barometer. *Eurobserv'er*. November 2017.
19. Zareei S., Khodaei J. Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Renewable Energy*. 2017.
20. Tian L., Shen F., Yuan H., et al. Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 2014. P. 86 - 91.
21. Viamajala S., Mcmillan J., Schell D., et al. Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations. Effects of saccharification and particle size. *Bioresource Technology*. 2009.
22. Dehkordi K., Fazilati M., Hajatzadeh A. Surface Scraped Heat Exchanger for cooling Newtonian fluids and enhancing its heat transfer characteristics, a review and a numerical approach. *Applied Thermal Engineering*. 2015. P. 56 - 65.
23. S Yang, L Zhang, H Xu, Experimental study on convective heat transfer and flow resistance characteristics of water flow in twisted elliptical tubes, *Applied Thermal Engineering*, 2011.
24. Angelidaki, I., Ellegaard, L., 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Appl. Biochem. Biotechnol.*
25. Tkachenko S.I., Pishenina N.V. Novi metody vyznachennia intensyvnosti teploobminu v systemakh pererobky orhanichnykh vidkhodiv: monohrafiia. Vinnytsia: VNTU, 2017. 234 s.
26. Semenenko Y.V. Proektyrovanye biyohazovikh ustanovok. Kyiv. Tekhnyka, 1992. 346 s.
27. Nykytyn H.A. Metanovoe brozhenye v byotekhnolohiy. Uchebnoe posobie. Kyiv. Vyshcha shkola, 1990. 207 s.
28. 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. doi: 10.32933/ActaInnovations.42.2.
29. Tkachenko S.I., Vlasenko O.V., Stepanova N.D., Pavlovych Ye.O. Nestatsionarnyi teploobmin u vertykalnomu tsylindrychnomu ob'emi, zapovnenomu ridynoiu. *Visnyk VPI*. 2022. № 1. S. 16 – 20.

30. Tkachenko S., Vlasenko O., Rezydent N. Teploobmin tsylindrychnoho ridynnoho tila obmezhenoi vysoty z navkolyshnim seredovyshchem. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. 2021. № 2. S. 27 – 30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

31. Tekhnolohiia tsukrystykh rechovyn: laboratornyi praktykum. M. P. Kupchyk ta in. Kyiv : NUKhT, 2007. 393 s.

32. Angelidaki, I., Ellegaard, L., 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. Appl. Biochem. Biotechnol. 2003. No 109. P. 95 – 105.

33. Schnell, S., Maini, P.K. Century of Enzyme Kinetics: Reliability of the KM and Vmax Estimates. Comments on Theoretical Biology. 2003. P. 169 – 187.

UDC 536.24

Professor **Olha Chernousenko**,
chernousenko20a@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1427-8068,
Assistant professor **Olha Vlasenko**,
olgakytsak7@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8975-0873,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”
Professor **Oleksandr Nedbailo**^{1,2},
nan_sashulya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8218-3933,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”
Institute of Technical Thermophysics of the NAS of Ukraine
Professor **Stanislav Tkachenko**,
tkachenko@vntu.edu.ua, ORCID: ORCID 0000-0002-4654-2062,
Vinnytsia National Technical University,

Abstract. *The aim of the work is to develop a reliable method for predicting the intensity of heat exchange in a round tube of a natural heat exchanger in various technological regimes that occur in biogas technologies (using the criterion equations of heat exchange, but with limited information on the thermophysical properties of the substrate). Research materials and methods. The presented work uses an improved experimental and computational method based on the combined use of the theory of similarity and the analysis of the parameters of the regular thermal regime. During the research, a real substrate from an operating biogas plant was used. The reason for the high intensity of heat exchange is the direct contact of substances on the boundary surfaces of the phases, which must be supported by the continuous renewal of these surfaces thanks to the constant mixing of the substrate.*

The experiment was carried out on a portable experimental setup. The heat exchange of model fluids and substrate from an operating biogas plant was investigated. An array of experimental data on the heat transfer coefficient of model fluids and the substrate was obtained. The results of experiments on the heat transfer coefficient for model fluids are summarized. The criterion equation of heat exchange was obtained. It is hypothesized that the criterion equation of heat exchange also corresponds to the substrate. For the substrate, the density, thermal expansion coefficient, specific heat capacity, and additive thermal conductivity were determined experimentally. Using the criterion equation of heat exchange and determined thermophysical properties, the viscosity of the substrate in the temperature range is determined. Using the known criterion equations of heat exchange and the determined viscosity, the parameters of the intensity of heat exchange in the round tube of the heat exchanger of the biogas plant are determined. The use of the proposed experimental and calculation method provides an opportunity, in conditions of limited information on the thermophysical and rheological properties of the liquid medium, to predict the parameters of the heat exchange intensity in the heat exchanger pipe used in biogas technologies.

Keywords: regular thermal regime, substrate, biogas plant, thermophysical properties, experimental and calculation method.