

УДК 536.24:631.371

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.;

Н. В. Резидент, асп.

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВХІДНИХ ДАНИХ

*Запропоновано доступну експериментально-розрахункову методику визначення коефіцієнтів тепловіддачі від твердої стінки до складних нестабільних в часі органічних сумішей в умовах природної і вимушеної конвекції при різному геометричному виконанні поверхні теплообміну.*

Теплообмін в системах біоконверсії визначається складністю та різноманітністю умов, в яких він протікає. Відходи тваринництва, органічні суміші рослинного походження можуть використовуватись в різних співвідношеннях, з різною вологістю, при різних температурах. В свою чергу комбінації сумішей можуть являти собою грубодисперсні, тонкодисперсні та колоїдні системи. Окрім того потрібно враховувати інші умови: розшарування за часом, вплив процесу бродіння на гідродинаміку і теплообмін; залежність швидкості осадження частинок від концентрації дисперсної системи та вплив гравітаційних потоків на розшарування. Теплообмінна поверхня теплопередавального елемента має різне конструктивне виконання і розміщена в біореакторі як в зоні осаду так і в зоні з пониженою концентрацією.

Інформація про теплофізичні параметри відходів в повному обсязі з точністю, яка необхідна для коректного застосування критеріальних рівнянь, нам невідома. Є лише обмежена інформація з теплофізичних характеристик, але при цьому існують суттєві розбіжності. За [1—3] відомо, що теплоємність стоків змінюється в залежності від їх вологості від  $C_c = 1,71 \dots 3,22$  кДж/(кг·К), густина  $\rho_c$  для субстрату з вологістю  $W \leq 92$  % може досягати  $1080$  кг/м<sup>3</sup>, густина твердих включень змінюється від  $800$  до  $1750$  кг/м<sup>3</sup>, в'язкість субстратів ВРХ та свиней  $\rho_c$  при зміні вологості від  $86$  до  $98$  % зменшується в  $1000$  раз, коефіцієнт теплопровідності субстратів  $\rho_c$  визначається за оціночними залежностями для дисперсних середовищ [4].

В системах біоконверсії виникають різні режими теплообміну в залежності від: а) усередненої об'єму масової концентрації сухих речовин  $\bar{C}$ ; б) розміщення теплообмінника:  $C > \bar{C}$ ,  $\bar{C} \approx C$ ,  $\bar{C} < C$ , де  $C$  — локальне значення масової концентрації в зоні теплообміну; в) температурних напорів  $\Delta t$ ; г) режимів зброджування: психрофільний  $t = 16,5 \dots 20$  °С, мезофільний —  $32 \dots 33$  °С, термотолерантний —  $32 \dots 42$  °С, термофільний —  $52 \dots 54$  °С.

За результатами нашого аналізу, в основному реалізуються такі режими:

— *вимушена конвекція в круглих трубах і кільцевих каналах, режим течії ламінарний.* В умовах теплообміну розрізняють дві форми ламінарного руху — в'язкісний і в'язкісно-гравітаційний;

— *постійна вимушена конвекція біля горизонтальних труб;*

— *вільна конвекція біля горизонтальних труб* — ламінарний, перехідний режими;

— *вільна конвекція біля вертикальної стінки* — перехідний, турбулентний режими.

Із вище наведеного випливає, що на багатоманітність композицій сумішей, гідродинамічних режимів та теплообмінних поверхонь накладається різноманітність режимів теплообміну. Експериментальні дослідження теплообміну до субстратів в системах біоконверсії вкрай обмежені [4—9].

Тому, метою досліджень є запропонувати нетрадиційний підхід до виявлення закономірностей теплообміну в цих умовах. Суть експериментально-розрахункового методу, що пропонується, полягає в такому:

а) експериментально визначається коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  до субстрату в базовому режимі (БР) теплообміну при температурі субстрату  $t_c$  і температурному напорі між грійною стінкою і субстратом  $\Delta t$ , які відповідають шуканим режимам (ШР);

б) з застосуванням відповідних БР критеріальних рівнянь і експериментальних значень  $\alpha_{експ}^{баз}$  визначаємо комплекс фізичних властивостей  $КФВ_{експ}^{баз}$ , який відповідає БР;

в) з використанням критеріальних рівнянь, які відповідають ШР теплообміну і значень  $КФВ_{експ}^{баз}$ , розраховується комплекс фізичних властивостей  $КФВ_{експ}^{шук}$ , який відповідає ШР;

г) в структуризоване критеріальне рівняння, яке описує ШР теплообміну, підставляємо  $КФВ_{експ}^{шук}$  і визначаємо експериментально-розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{ер}^{шук}$ . Нижче наводимо конкретні приклади реалізації запропонованого експериментально-розрахункового методу. За БР приймається, що теплообмін здійснюється між вертикальною стінкою і субстратом в перехідному режимі природної конвекції, в подальшому  $-\alpha_{експ}^{баз} = \alpha_{в.к.}$ . За ШР — теплообмін здійснюється в умовах вимушеної конвекції в кільцевому каналі, режим руху в'язкісно-гравітаційний, в подальшому  $\alpha_{ер}^{шук} = \alpha_{вк(вг)}$ .

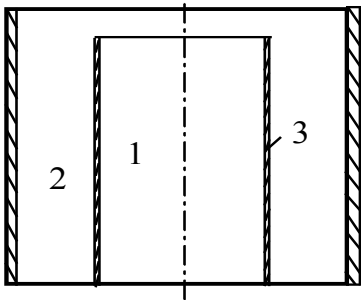


Рис. 1. Принципова схема теплообміну: 1, 2 — циліндричні коаксіальні ємності для води, субстрату; 3 — теплообмінна стінка

Дослідна установка для дослідження тепловіддачі за умов вільної конвекції складається з двох ємностей (рис. 1), які мають гладку теплообмінну поверхню і виконані у вигляді двох ємностей, вкладених одна в одну таким чином, що утворені дві робочі порожнини — внутрішня та зовнішня у вигляді кільцевого зазору. З метою зменшення тепловтрат в навколишнє середовище зовні установка ізольована. Діаметр та висота зовнішньої ємності складає  $D = 200$  мм,  $H = 120$  мм, а розміри внутрішніх ємностей —  $d_1 = 76$  мм,  $h_1 = 88$  мм,  $d_2 = 96$  мм,  $h_2 = 120$  мм, товщина стінки внутрішніх ємностей —  $\delta_{ст} = 0,5$  мм. Термічний опір стінки не перевищує 0,1 % від загального термічного опору теплопередачі від

грійної води до субстрату.

Дослідження теплообміну між вертикальною циліндричною стінкою і сумішшю проводиться таким чином. Заливається теплоносієм у внутрішню ємність, а суміш, що нагрівається — в кільцевий канал. Фіксується температура суміші в каналі та температура грійної води через деякі проміжки часу. Після досягнення різниці температур між рідинами в 3...5 °С дослід закінчується.

На рис. 2—7 показана реалізація алгоритму а) — г) з одночасним аналізом і порівнянням наших результатів з експериментальними дослідженнями інших авторів [5—7]. Характерні результати вимірювань температур грійної води  $\bar{t}_g = f(\tau)$  та субстрату ВРХ  $\bar{t}_c = f(\tau)$  вологістю  $W = 86$  % показані на рис. 2.

Результати розрахунку температурних напорів  $\bar{\Delta t}$  (рис. 3), кількості теплоти  $Q^{\Sigma}$  переданої через поверхню теплообміну за час  $\tau$ , осереднених в часі коефіцієнтів тепловіддачі від грійної води до теплообмінної стінки  $\bar{\alpha}_g$  та від стінки до субстрату  $\alpha_{експ}^{баз}$  (рис. 4, 5) одержані за методикою наведеною в [9].

Експериментальні дослідження теплообміну від вертикальної циліндричної стінки проводились також на субстратах свиней та суміші субстратів ВРХ і свиней у співвідношенні 1:1. Зіставлення коефіцієнтів тепловіддачі до субстратів ВРХ, свиней та суміші наведено на рис. 6. Результати досліджень наведені при температурному напорі  $\Delta t = 18$  °С, температура субстрату складає  $t_c = 35$  °С.

Значення в'язкості субстратів ВРХ та свиней в діапазоні вологостей 90...98 % мало відрізняються між собою, а при  $W \leq 90$  % в'язкість субстрату свиней на порядок менша ніж для ВРХ [2], що в свою чергу викликає розбіжність в значеннях коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_{в.к.}$

Експериментально комплекс фізичних властивостей для базового варіанту визначається за залежністю

$$КФВ_{експ}^{баз} = \frac{\alpha_{в.к.}}{A}, \tag{1}$$

де  $A = 0,54 \frac{(g \beta \Delta t)^{0,25}}{H^{0,25}}$ ;  $\beta$  — коефіцієнт температурного розширення;  $\Delta t$  — температурний напір;  $H$  — висота поверхні теплообміну.

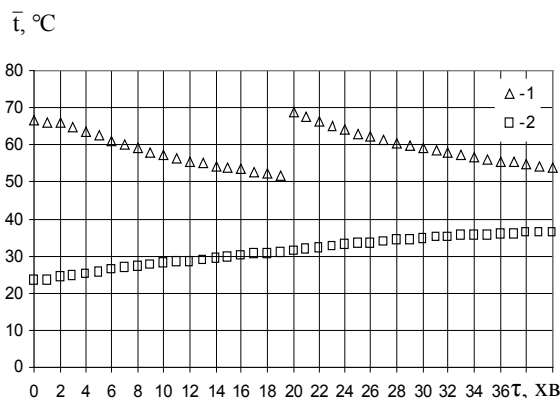


Рис. 2. Зміна температури теплоносія та суміші за часом 1 — грійна вода; 2 — субстрат

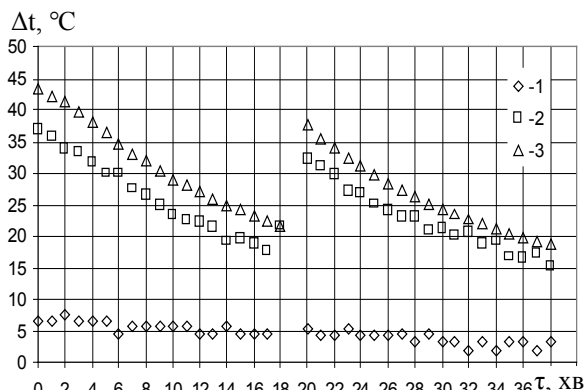


Рис. 3. Зміна температурного напору за часом 1 — між стінкою і грійною водою; 2 — між стінкою і субстратом; 3 — загальний температурний напір

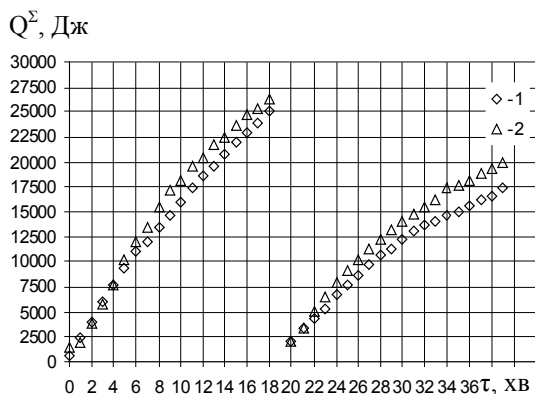


Рис. 4. Кількість теплоти  $Q^\Sigma$ , яка передається через поверхню теплообміну в залежності від часу

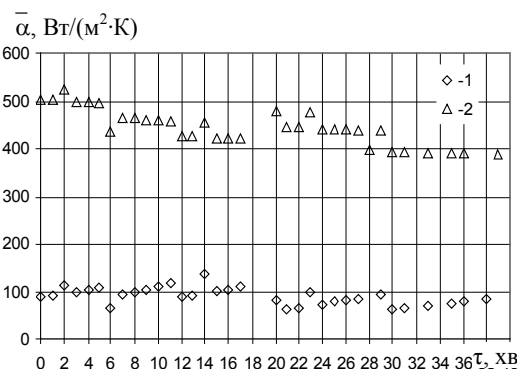


Рис. 5. Зміна значення усередненого коефіцієнта тепловіддачі за часом: 1  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  від поверхні теплообміну до субстрату ВРХ; 2 — від грійної води до поверхні теплообміну

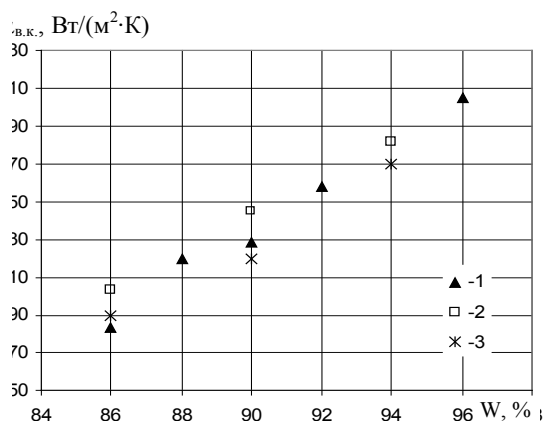


Рис. 6. Експериментальні значення коефіцієнтів тепловіддачі від металевої стінки до субстратів за умов вільної конвекції: 1 — ВРХ; 2 — свині; 3 — суміш;  $t_c = 35^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_c = 18^\circ\text{C}$

Для перехідного режиму вільної конвекції, коли відомі теплофізичні параметри,  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  визначається розрахунковим методом

$$K\Phi B_{\text{експ}}^{\text{баз}} = \frac{\lambda_c^{0,75}}{\nu_c^{0,25}} (C_c \rho_c)^{0,25} \left( \frac{Pr_c}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \quad (2)$$

Критеріальна залежність для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в умовах вимушеної конвекції (в'язкісно-гравітаційний режим) має вигляд [10]

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr_c^{0,33} (Gr Pr_c)^{0,1} \left( \frac{Pr_c}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \varepsilon_L, \quad (3)$$

а відповідно їй комплекс фізичних властивостей -

$$K\Phi B_{\text{вк(вг)}} = \frac{\lambda_c^{0,57}}{\nu_c^{0,1}} (C_c \rho_c)^{0,43} \left( \frac{Pr_c}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

де  $Pr$  — критерій Прандтля, нижні індекси:  $c$  — температура субстрату,  $ст$  — температура стінки;  $Gr$ ,  $Re$  — відповідно критерії Грасгофа, Рейнольдса при температурі субстрату.

Із (2) та (4) при однакових  $t_c$  і  $\left( \frac{Pr_c}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}$  випливає, що шуканий комплекс фізичних властивостей

$$K\Phi B_{\text{вк(вг)}} = \left[ \frac{\nu_c^{0,15}}{\lambda_c^{0,18}} (C_c \rho_c)^{0,18} \right] K\Phi B_{\text{експ}}^{\text{баз}} \quad (5)$$

Коефіцієнт тепловіддачі в умовах вимушеної конвекції з в'язкісно-гравітаційним режимом визначаємо за структурованою залежністю

$$\alpha_{\text{вк(вг)}} = \Pi_{\text{ТФВ}} K\Phi B_{\text{експ}}^{\text{баз}} 0,15 w^{0,33} d^{-0,37} (g \beta \Delta t)^{0,1}, \quad (6)$$

де  $\Pi_{\text{ТФВ}} = \nu_c^{0,15} \lambda_c^{-0,18} (C_c \rho_c)^{0,18}$  — корегуючий параметр;  $w$  — швидкість потоку, м/с;  $\beta$  — коефіцієнт температурного розширення, 1/К;  $\Delta t$  — температурний напір, °С;  $d$  — діаметр каналу, м.

Для розрахунків  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  використовується значення в'язкості, які визначенні за формулами наведеними в [3] та [4] відповідно

$$\mu_c = \mu_v \left[ 1 + 2,5 \left( c + 10 \frac{c - 2}{8 - 0,7c} \right) \right]; \quad (7)$$

$$\mu_c = \mu_v \left[ 1 + 10 \left( c + 10 \frac{c - 2}{11 - \beta c} \right) \right], \quad (8)$$

де  $\mu_v$  — динамічна в'язкість води, Па·с;  $\beta$  — коефіцієнт, який залежить від виду стоків і складає  $\beta = 0,7 \dots 0,75$  для ВРХ,  $\beta = 0,6 \dots 0,7$  — для свиней.

Для суміші субстратів рекомендується залежність (7). Для оцінки значень інших теплофізичних параметрів скористалися рекомендаціями, які наведені в [4].

Емпірична залежність запропонована в [5, 7] для визначення коефіцієнта тепловіддачі в умовах вимушеної течії субстрату ВРХ має вигляд

$$\alpha_{\text{вк(вг)}} = 27 \omega^5 \theta^{-0,1} (\rho w)^{0,33} d_e^{-0,37}, \quad (9)$$

де  $\omega = \frac{W}{100}$  — відносна вологість;  $\theta = \frac{t}{100}$  — відносна температура;  $d_e$  — еквівалентний діаметр кільцевого каналу, м;  $\rho$  — густина субстрату, кг/м<sup>3</sup>.

Залежність (9) справедлива в таких межах:  $d_e = 0,05 \dots 0,088$  м;  $W = 86 \dots 98$  %;  $t_c = 25 \dots 55$  °С.

Результати розрахунків за запропонованою нами методикою та розрахунки за емпіричною залежністю (9) показані на рис. 7.

Із рис. 7 бачимо, що розбіжність між коефіцієнтами тепловіддачі визначеними за експериментально-розрахунковою методикою для субстратів ВРХ (крива I) і за емпіричною залежністю (кри-

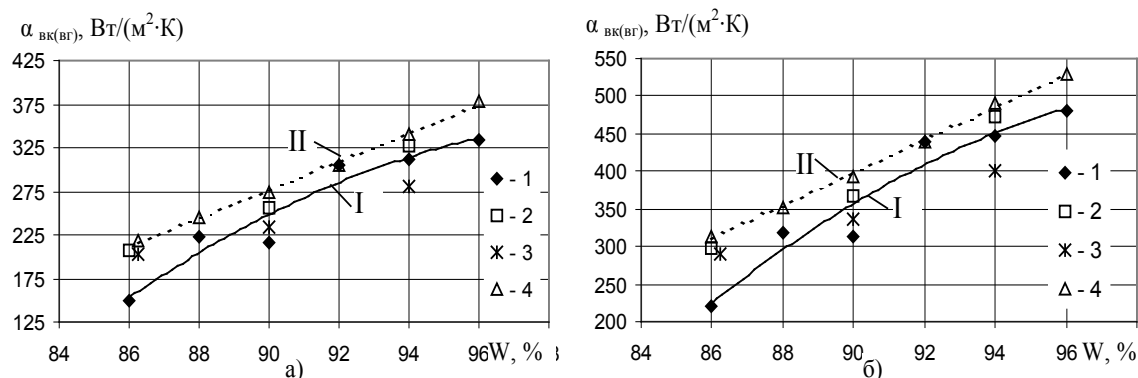


Рис. 7. Коефіцієнти тепловіддачі отримані експериментально-розрахунковим методом, вимушена конвекція:  $t_c = 35$  °C,  $\Delta t = 18$  °C,  $d_e = 0,05$  м; 1 — субстрат ВРХ; 2 — субстрат свиней; 3 — суміш субстратів ВРХ і свиней; 4 — розрахунки за (9); а)  $w = 0,2$  м/с; б)  $w = 0,6$  м/с

ва II), в основному, не перевищує 30 %. Інтенсивність теплообміну до субстратів свиней вища за інтенсивність теплообміну до субстратів ВРХ. Це пояснюється відмінністю фізичних властивостей цих субстратів.

### Висновки

1. В зв'язку з обмеженістю інформації про теплофізичні властивості органічних відходів рослинного та тваринного походження використано специфічні комплекси теплофізичних параметрів сумішей, які адекватні режимам теплообміну. Розроблені доступні методи оцінки цих комплексів, які можна реалізувати з використанням нескладних теплообмінних пристроїв та математичної моделі робочих процесів, що значно простіше в порівнянні з визначенням кожного теплофізичного параметра окремо.

2. Запропоновано доступну експериментально-розрахункову методику визначення коефіцієнтів тепловіддачі від твердої стінки до складних нестабільних в часі органічних сумішей в умовах природної і вимушеної конвекції при різному геометричному виконанні поверхні теплообміну. Методика реалізується при мінімальному обладнанні експериментального стенда та з застосуванням програми створеної на основі математичної моделі розробленої авторами.

3. Коефіцієнти тепловіддачі від металеві стінки до органічних сумішей за умов вимушеної конвекції, які визначені за запропонованою методикою, порівняно з експериментальними даними інших авторів. Розбіжність знаходиться, в основному, в межах 30 %.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сурнин В. И. Использование жидкого навоза. — М.: Россельхозиздат, 1978. — 64 с.
2. Технология орошения животноводческими стоками / А. М. Буцкин, В. Г. Луцкий, А. Г. Пономарев, Л. П. Рева. — М.: Агропромиздат, 1987. — 160 с.
3. Пузанков А. Г., Мхитарян Г. А., Гришаев И. Д. Обеззараживание стоков животноводческих комплексов. — М.: Агропромиздат, 1986. — 175 с.
4. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Резидент Н. В. Залежності для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі в системах термостабілізації біогазового реактора // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 2. — С. 65—70.
5. Бердыев О. Результаты экспериментального исследования конвективной теплоотдачи при вынужденном движении жидких органических отходов в теплообменных аппаратах. Известия АН ТССР. — Сер. ФТН и ТН, 1988. — С. 103—104.
6. Шрамков В. М., Савин В. Л., Таиров Б. Д., Бердыев О. Тепловой баланс теплообменного аппарата для жидкого навоза — Труды ВНИИКОМЖ — а. Исследование и конструирование машин и механизмов для кормопроизводства. — М.: 1986. — С. 116—123.
7. Бердыев О. Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза: Автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.14.04 / НПО «Солнце». — Ашхабад, 1989. — 24 с.
8. Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. Тепловіддача до багатокомпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — № 1. — С. 111—114.
9. Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. Дослідження теплообміну до багатокомпонентних органічних сумішей в умовах вільної конвекції біля вертикальної циліндричної стінки // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — № 4. — С. 37—42.
10. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. — М.: Энергия, 1967. — 412 с.

**Ткаченко Станіслав Йосипович** — завідувач кафедри, **Резидент Наталія Володимирівна** — аспірант. Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет