

УДК 631.731

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.;

Д. В. Степанов, к. т. н.;

Н. В. Резидент, асп.

## ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДАЧІ В СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ БІО- ГАЗОВОГО РЕАКТОРА

### Вступ

Досвід експлуатації промислових, дослідно-промислових і експериментальних біоенергетичних систем анаеробного зброджування екскрементів тварин і птахів показують, що найневирішенішими в впроваджуваних системах метанового зброджування, є питання вибору, розроблення і розрахунку теплообмінних пристроїв для нагрівання та утилізації теплоти зброженого субстрату [1]. З цієї причини не розроблені і серійно не випускаються теплообмінні апарати для систем біоконверсії. Для того, щоб оцінити доцільність застосування того чи іншого теплообмінного апарату необхідним є визначення коефіцієнтів тепловіддачі.

Субстрат є складним багатокомпонентним середовищем. Тому дослідження коефіцієнтів тепловіддачі до субстрату та його теплофізичних властивостей поряд з практичною мають велику наукову цінність, оскільки фізичні властивості, тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ не вивчені в такій мірі, як це потрібно для інженерної практики в різних галузях промисловості.

### Результати досліджень

Основною метою даної роботи є виявлення і обґрунтування залежностей для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні теплообміну до субстрату з вимушеною конвекцією. Для досягнення цієї мети потрібно: визначити методи оцінки значень теплофізичних параметрів тваринницьких стоків (субстратів); визначити режими течії і теплообміну субстрату в каналах для умов, коли зберігається нормальна життєдіяльність метанотворювальних бактерій; дослідити структури критеріальних залежностей з метою їх застосування для розрахунку теплообміну в круглих трубах і кільцевих каналах.

В першу чергу треба достовірно оцінювати такі теплофізичні параметри субстрату з вмістом сухих речовин  $c = 2 \dots 14$  % в діапазоні температур  $t = 20 \dots 55$  °C: густину  $\rho$ , теплоємність  $C$ , теплопровідність  $\lambda$ , динамічну в'язкість  $\mu$ , температурний коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta_{\text{тр}}$ .

Густину стоків можна визначити за формулою [2]

$$\rho_c = 1000 + 2,4c, \quad (1)$$

де  $c$  — вміст сухих речовин, %.

Густина сухих речовин в стоках (субстраті) коливається в межах від 800 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Експериментальні значення густини стоків (субстрату), які приведені в [3], задовільно описуються залежністю (1).

Залежності для визначення теплоємності, теплопровідності, коефіцієнта температурного розширення стоків (субстратів) нам невідомі. До того ж експериментальне визначення теплофізичних властивостей ускладнюється тим, що стоки (субстрати) мають різне походження.

На даному етапі досліджень, на наш погляд, для оцінки значень теплоємності  $C$ , теплопровідності стоків (субстратів)  $\lambda$  доцільно скористатись наявними залежностями для дисперсних потоків рідина-тверді частинки [4, 5]:

$$C = C_{\text{сух}}c + C_{\text{в}}(1 - c); \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{сух}}c + \lambda_{\text{в}}(1 - c); \quad (3)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_B} = \frac{2\lambda_B + \lambda_T - 2\beta_T(\lambda_B - \lambda_T)}{2\lambda_B + \lambda_T + 2\beta_T(\lambda_B - \lambda_T)}, \quad (4)$$

де  $C_B, C_{\text{сух}}$  — відповідно питома теплоємність води, безводної речовини, кДж/(кг·К);  $\lambda_B$  — теплопровідність води, Вт/(м·К);  $\lambda_{\text{сух}} (\lambda_m)$  — теплопровідність безводної речовини (твердих частинок), Вт/(м·К);  $\beta_{\text{сух}} (\beta\beta_m)$  — об'ємна концентрація безводної речовини (твердих частинок), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Для оцінки  $C$  і  $\lambda$  теплоємність безводної речовини приймалась  $C_{\text{сух}} = 0,88 \dots 2,72$  кДж/(кг·К), а  $\lambda_{\text{сух}} = 0,073 \dots 0,72$  Вт/(м·К) [6].

Проведений нами аналіз показав, що розбіжність між значеннями коефіцієнта теплопровідності, які розраховані за формулами (2) і (3), знаходиться в межах 0,6...3,5 %.

Не менш складна ситуація з визначенням в'язкості стоків (субстратів) з різним вмістом сухих речовин і температурах. Експериментальні значення динамічної в'язкості  $\mu$  стоків (субстратів) свиней і ВРХ показані в [3].

В таблицях [5] не показані значення  $\mu$  в умовах вологості стоків  $W = 95 \dots 98$  % ( $c = 2 \dots 5$  %) для свиней. Експерименти по визначенню динамічної в'язкості показують [2], що при  $W < 92$  % ( $c > 8$  %)  $\mu$  залежить від виду речовин, які входять в склад стоків, та строків їх зберігання, а при  $W > 92$  % ( $c < 8$  %) вирішальну роль має кількість дисперсного середовища. При температурі 20 °С і вологості  $W < 98$  % ( $c > 2$  %) запропонована залежність [2]

$$\mu = \mu_B \left[ 1 + 2,5 \left( c + 10 \frac{c-2}{8-\beta c} \right) \right], \quad (5)$$

тоді кінематична в'язкість

$$\nu = \mu_B \left[ 1 + 2,5 \left( c + 10 \frac{c-2}{8-\beta c} \right) \right] \rho^{-1}, \quad (5a)$$

а якщо  $W \geq 98$  % ( $c \leq 2$  %), то

$$\mu = \mu_B \cdot (1 + 2,5 c). \quad (6)$$

де  $\mu_B$  — 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.

В [4, 5] приведені залежності для визначення  $\mu$  рідинних суспензій (рідина-тверді частинки):

$$\mu = \mu_B \cdot \left( 1 + 2,5\beta_T + 7,17\beta_T^2 + 16,2\beta_T^3 \right); \quad (7)$$

$$\mu = \mu_B (1 - \beta_T)^{-2,8}; \quad (8)$$

$$\mu = \mu_B (1 - \beta_T)^{-2,5}; \quad (9)$$

$$\mu = \mu_B (1 - \beta_T)^{-2,285}; \quad (10)$$

$$\mu = \mu_B \left[ 1 + 2\beta_T \frac{(1 + b_T^2)}{(1 - b_T^2)} \right]; \quad (11)$$

$$\mu_c = \mu_B \left[ 1 + 2b \frac{(1 + b)^2}{(1 - b)^2} \right]^m, \quad (12)$$

$$\text{де } b = \frac{m \left( \frac{\rho_B}{\rho_T} \right)}{1 + m \left( \frac{\rho_B}{\rho_T} \right)}; m = \frac{(\rho_C - \rho_B) \left( \frac{\rho_T}{\rho_C} \right)}{\rho_T - \rho_B}, \rho_B, \rho_m, \rho_C \text{ — відповідно густина води, твердих частинок,}$$

стоків, кг/м<sup>3</sup>.

Проведений нами аналіз показав, що розбіжність між значеннями  $\mu$ , які розраховані за допомогою залежності (5) і залежностями (7)—(12) знаходиться в межах від 5 до 1800 раз.

Враховуючи результати співставлення залежностей (5) і (7)—(12), а також те, що в таблицях [5] не наведені значення  $\mu$  якщо вологість  $W = 95 \dots 98 \%$  для свиней, а за допомогою залежності (5) не можна розрахувати в'язкість стоків, які мають вологість  $W = 86 \dots 88 \%$ , нами на основі структури залежності (5), з урахуванням експериментальних даних [5], рекомендовано оцінювати динамічну в'язкість стоків свиней і ВРХ при  $W = 86 \dots 98 \%$  ( $c = 2 \dots 14 \%$ ) і  $t = 20 \dots 55 \text{ }^\circ\text{C}$  за допомогою формули, Па·с

$$\mu = \mu_B \left[ 1 + 10 \left( c + 10 \frac{c - 2}{11 - \beta c} \right) \right], \tag{13}$$

тоді кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>/с

$$\nu = \mu_B \left[ 1 + 10 \left( c + 10 \frac{c - 2}{11 - \beta c} \right) \right] \rho^{-1}. \tag{13a}$$

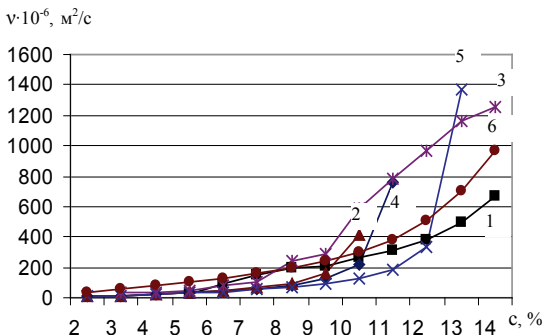


Рис. 1. Залежність кінематичної в'язкості  $\nu$  від вмісту сухих речовин  $c$ , якщо температура субстрату  $t_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 1 показані експериментальні дані по кінематичній в'язкості  $\nu$  субстрату свиней, великої рогатої худоби (ВРХ), а також результати розрахунків  $\nu$  за допомогою формул (5) і (13). Криві 1, 3 — експериментальні дані [3] відповідно для субстрату свиней, ВРХ; криві 2, 4, 5 — розраховані за формулою (5) відповідно, якщо  $\beta = 0,75, 0,7$  і  $0,6$ ; 6 — розрахована за формулою (13) з  $\beta = 0,7$ .

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення:  $\beta_p$  приймається таким як для води в залежності від температури, якщо тиск  $P < 5$  бар.

Графік (рис. 1) дає уявлення наскільки наявна інформація про в'язкість тваринницьких стоків (субстратів) неоднозначна для даних і залежностей, які найбільше збігаються між собою.

Для збереження нормальної життєдіяльності метанотворювальних бактерій рекомендується [1], щоб швидкість субстрату не перевищувала 0,6 м/с.

Режим течії субстрату нами визначався за допомогою безрозмірного числа Рейнольдса

$$Re_* = \frac{w d_e}{\nu_*}, \tag{14}$$

де  $w$  — швидкість, м/с;  $d_e$  — еквівалентний діаметр каналу, м;

$$\begin{cases} \nu_* = \nu, \text{ якщо } \tau_0 = 0, \nu = \mu/\rho; \\ \nu_* = \nu + \tau_0 d_e / (6\rho\nu), \text{ якщо } \tau_0 \neq 0, \end{cases} \tag{15}$$

$\tau_0$  — граничне напруження зсуву [3], Па.

При  $Re_* < 2300$  вважали, що течія ламінарна, в рамках якої в умовах теплообміну може реалізуватись в'язкий ( $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$ ) або в'язкісно-гравітаційний режими течії ( $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$ ).

Тут 
$$Gr = g \beta_{тр} \Delta t d_e^3 / \nu_*^2; Pr = \nu_* / a; a = \lambda / C\rho; \Delta t = t_{ст} - t_0, \tag{16}$$

де  $t_{ст}, t_0$  — відповідно температура стінки, температура рідини на вході в канал;  $\nu_*, C, \rho, \beta_{тр}$  — фізичні параметри субстрату, які входять в  $Gr \cdot Pr$  і вибираються по температурі  $t = 0,5(t_0 + t_{ст})$ .

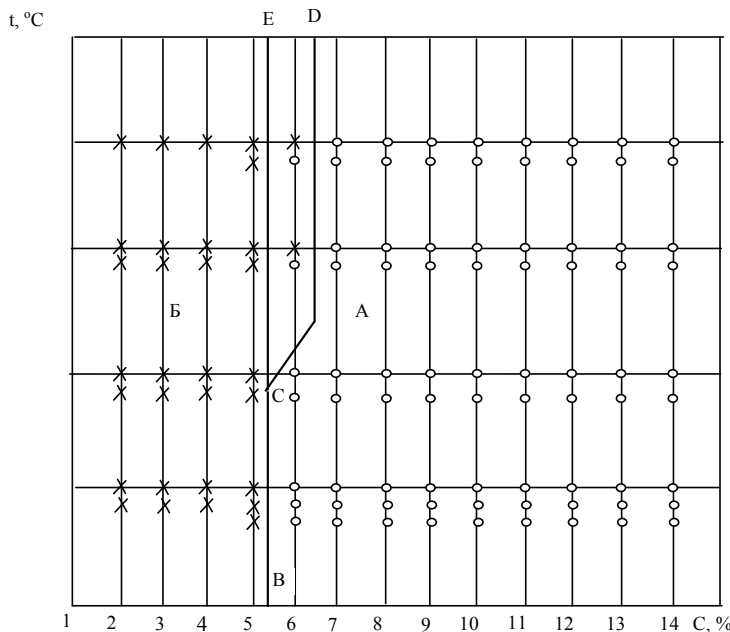


Рис. 2. Карта режимів течії субстрату: область А – в'язка течія; Б – в'язкісно-гравітаційна течія

Карта течій субстрату (рис. 2), якщо  $Re \leq 2300$ , побудована в умовах його нагріву в каналі з еквівалентним діаметром  $d_e = 0,05$  м з температурним напором між грійною стінкою і субстратом  $\Delta t = 17$  °С та швидкістю течії  $w \approx 0,2 \dots 0,6$  м/с.

В'язкість субстрату визначалась за залежностями (5а) і (13а) з  $\beta = 0,7$ , та  $t = 20$  °С використовувались також експериментальні значення в'язкості і граничного напруження зсуву, які є в [3]. На рис. 2 границя між в'язкою і в'язкісно-гравітаційною течією, тобто між областями А і Б, проходить по кривій VCD, коли  $\nu_*$  розраховується з використанням залежності (5а), і по кривій VCE —  $\nu_*$  (13а).

Таким чином, коли вміст сухих речовин в субстраті не перевищує  $c < 5,5 \dots 6,5$  % можливе існування в'язкісно-гравітаційної течії, коли  $c >$

$5,5 \dots 6,5$  % — в'язкої течії.

Проведені дослідження [1] теплообміну субстрату ВРХ вологістю  $W = 86 \dots 98$  % в кільцевих каналах еквівалентним діаметром  $d_e = 0,05 \dots 0,088$  м і довжиною  $l = 0,96 \dots 12$  м. Температура субстрату змінювалась в межах  $t = 25 \dots 55$  °С, швидкість руху —  $w = 0,2 \dots 0,6$  м/с, температурний напір між грійною стінкою і субстратом  $-\Delta t = 4 \dots 35$  °С.

За результатами експериментів запропонована емпірична залежність [1] для визначення коефіцієнта тепловіддачі від грійної стінки до субстрату ВРХ

$$\alpha = 27 \omega^5 \theta^{-0,1} (\rho w)^{0,33} d_e^{-0,37}, \tag{17}$$

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

Вплив температурного напору  $\Delta t$  і довжини теплообмінного каналу  $l$  на коефіцієнт тепловіддачі в залежності (17) не враховується.

Для розрахунку коефіцієнтів теплообміну в умовах ламінарного режиму в круглих трубах відомі залежності [7, 8]:

— для в'язкої течії

$$\overline{Nu}_{p, d} = 1,55 \left( Pe_{p, d} \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_{ст}}{\mu_p} \right)^{-0,14} \varepsilon_e \tag{18}$$

— для в'язкісно-гравітаційної течії

$$\overline{Nu}_{p,d} = 0,15 Re_{p,d}^{0,33} Pr_p^{0,33} \left( Cr_{p,d} Pr_p \right)^{0,1} \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \epsilon_e. \quad (19)$$

В (18) і (19) середній коефіцієнт тепловіддачі віднесений до середнього логарифмічного напору  $\Delta t_{л}$ :

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_p}; \quad Pe_{p,d} = \frac{wd}{a_p}; \quad Re_{p,d} = \frac{wd}{\nu_p}; \quad Pr_p = \frac{\nu_p}{a_p}; \quad Pr_{ст} = \frac{\nu_{ст}}{a_{ст}},$$

фізичні властивості рідини, які входять в  $Nu$ ,  $Pe$ ,  $Re$ ,  $Pr$ , а також значення  $\mu_p$  вибираються за визначальною температурою  $t_p$ , яка для залежності (18) —  $t_p = t_{ст} - 0,5\Delta t_{л}$ , для (19) —  $t_p$  прийнята як середня температура рідини в трубі;  $\Delta t_{л}$  — середній логарифмічний температурний напір;  $\mu_{ст}$ ,  $\nu_{ст}$ ,  $a_{ст}$  вибирається по середній температурі стінки  $t_{ст}$ ; визначальним розміром, який вводиться в  $\overline{Nu}$ ,  $Re$ ,  $Pe$ , є внутрішній діаметр труби (еквівалентний діаметр каналу). Величина  $\epsilon_e$  — поправка на гідродинамічну початкову ділянку, яка формується одночасно з початковою термічною ділянкою [7, 8].

З використанням залежностей (17), (18), і (19) проведено чисельний експеримент, результати якого показані на рис. 3.

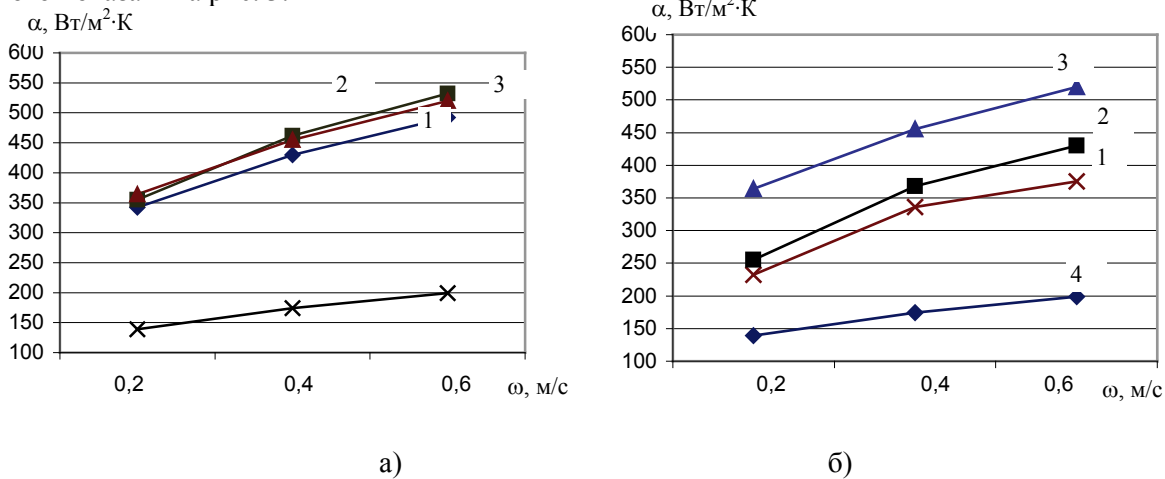


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від грійної стінки до субстрату в кільцевому каналі  $d_e = 0,05$  м при температурі субстрату  $t = 20$  °С.

Теплофізичні властивості субстрату визначались за нашими рекомендаціями, які наведені вище.

Цікаво, що в області в'язкої течії (рис. 3) з результатами розрахунків по емпіричній залежності (17) краще співпадають результати розрахунків по (19) ніж по (18).

Криві розраховані: 1 — за формулою (17); 2 — (19); 3 — (18) при  $l = 0,96$  м; 4 — (18) при  $l = 12$  м; а — при вмісті сухих речовин в субстраті  $c = 7$  %; б —  $c = 14$  %.

На даному етапі для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі з вимушеною конвекцією субстрату в круглих трубах і кільцевих каналах для умов, які створюються в системах термостабілізації біогазового реактора [1], нами рекомендується критеріальна залежність (19) з визначенням теплофізичних параметрів субстрату та безрозмірних чисел за формулами (1, 2, 3, 13, 13а, 14, 15). При цьому в залежності (19) стали 0,15 доцільно замінити на 0,22, тоді залежність (19) приймає вигляд

$$\overline{Nu}_{p,d} = 0,22 Re_{p,d}^{0,33} Pr_p^{0,33} \left( Cr_{p,d} Pr_p \right)^{0,1} \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \epsilon_e. \quad (20)$$

Залежність (20) рекомендується застосовувати в такому діапазоні параметрів:  $Re = 2,8 \dots 3794$ ;  $Pr = 39 \dots 9315$ ;  $Gr = 0,18 \cdot 10^3 \dots 912 \cdot 10^3$ .

## Висновки

1. Теплофізичні властивості, тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ, в тому числі і субстрату, не вивчені в такій мірі, як це потрібно для інженерної практики в різних галузях промисловості.

2. В результаті сумісного аналізу теплофізичних параметрів, існуючих критеріальних залежностей і емпіричних залежностей для розрахунку теплообміну в умовах ламінарної і перехідної течії субстрату в кільцевих каналах для інженерної практики рекомендована критеріальна залежність для розрахунку тепловіддачі від поверхні нагріву до субстрату великої рогатої худоби і свиней в кільцевих каналах і круглих трубах в діапазоні масових концентрацій  $c = 2 \dots 14 \%$  і температур  $t = 20 \dots 55 \text{ }^\circ\text{C}$  з обов'язковим користуванням методами визначення теплофізичних параметрів, які запропоновані в статті.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бердыев О. Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза. Автореф. дис... канд. техн. наук.: 05.14.04 / Ашхабад НПО «Солнце», 1989. — 24 с.
2. Технология орошения животноводческими стоками / А. М. Буцыкин, В. Г. Луцкий, А. Г. Пономарев, Л. П. Рева. — М.: Агропромиздат, 1987. — 160 с
3. Погорелый Л. В. Биотехнические системы в животноводстве. — К.: Урожай — 1992. — 344 с.
4. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. — М.: Энергия, 1970. — 424 с.
5. Лебедев П. Д. Теплообменные сушильные и холодильные установки. Учебник для студ. техн. вузов. — М.: Энергия, 1972. — 317 с.
6. Краснощекоев Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Изд 3-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 280 с.
7. Исаченко В. П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е пере раб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
8. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 2.10.03  
Рекомендована до опублікування 27.10.03

**Ткаченко Станіслав Йосипович** — завідувач кафедри; **Степанов Дмитро Вікторович** — доцент; **Резидент Наталія Володимирівна** — аспірант.

Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет.