

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 536.243

DOI 10.20535/1813-5420.4.2022.273390

С.Й. Ткаченко, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-4654-2062

О.В. Власенко, науковий співробітник, ORCID 0000-0002-8975-0873

Вінницький національний технічний університет

ПРОГНОЗУВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВІДДАЧІ В СУБСТРАТАХ БІОГАЗОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Для нашої країни розробка технологій енергозбереження та захисту навколишнього середовища знаходиться на етапі розробки, тому є потреба в економічно вигідному визначенні інтенсивності теплообміну в багатофазному багатокомпонентному середовищі, оскільки існує питання у виробництві енергозберігаючого теплоенергетичного обладнання.

У роботі розглядається теплообмін субстрату з діючої біогазової установки. В загальному субстрати складаються з трьох фаз, а саме рідкої (вода та розчин), твердої (рослинні домішки, листя, гній тварин) і газу (бульбашки біогазу). Наявність різних домішок у суміші може змінити її реологічні властивості залежно від природи субстрату та його контексту. У біогазових технологіях різні субстрати мають різні теплофізичні властивості. Найбільшу складність становить вимірювання теплопровідності, інші теплофізичні властивості можна оцінити за допомогою існуючих методів.

Для використання наведеного методу по прогнозуванню інтенсивності теплопереносу в субстратах біогазової технології авторами накопичено спостереження і експериментальні результати на експериментальному стенді на рідинах із відомими теплофізичними властивостями.

В біогазових технологіях існує проблема визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах, при її вирішенні доцільно використовувати теорію регулярного теплового режиму.

На представленому експериментальному стенді отримано масив інформації по «моделним рідинам» з відомою інформацією по теплофізичним властивостям, на основі якої виводиться залежність по теплообміну у критеріальному вигляді.

У випадку, який розглядається, в якості вихідних даних фігурує лише зразок багатофазного рідинного середовища, теплофізичні властивості якого обмежені, в літературі можуть бути лише фрагменти інформації.

В роботі, відносно визначення інтенсивності теплообміну, наведені лише рекомендації загального характеру.

Ключові слова: *регулярний тепловий режим, біогаз, субстрат, біогазова установка термостабілізація, теплофізичні властивості, експериментально-розрахунковий метод, математична модель.*

Вступ. Біогаз — біопаливо, яке утворюється природним шляхом під час розкладання органічних відходів. Коли органічна сировина, така як тваринництво, рослинництво, харчові відходи тощо, розкладається в анаеробному середовищі, виділяється суміш газів – метан та вуглекислий газ [1]. Тваринний гній, рослинні залишки та енергетичні культури, харчові відходи та продукти переробки є прикладами органічної сировини, яка може генерувати біогаз шляхом безкисневого розкладання [1]. При розкладанні останків будь-яких тварин або рослин у різному ступені вивільняються легкозаймісті гази. Для сировини ідеально підходять суміші різних компонентів: гній, солома, трава, різні відходи тощо [2].

Рослинна сировина чудово підходить для виробництва біогазу. Найбільше біопалива виробляють зі свіжої трави – з однієї тонни сировини отримують близько 250 м³ газу з вмістом метану 70%, з кукурудзяного силосу – 220 м³, з бадилля – 180 м³ [2]. В якості біомаси можна використовувати практично будь-яку рослину, сіно або водорості.

Відходи переробних підприємств також придатні для біогазових установок. Максимальний вихід біогазу забезпечують тваринні жири – 1500 м³/т біогазу з вмістом метану 87%. Головна перевага гною в тому, що він дешевий і легкодоступний. Недоліком є те, що кількість і якість біогазу нижчі, ніж у інших видів сировини. Виробничий цикл займає близько двох тижнів, вихід 60 м³ із вмістом метану 60% [2].

Курячий послід і свинячий гній безпосередньо застосовувати не можна, тому що вони токсичні. Щоб запустити процес ферментації, їх треба змішати з силосом [3].

Субстрати та компоненти субстрату, які застосовуються в біогазових технологіях [4]: гній ВРХ природний (88% вологість); гній свинний самосплавний (95% вологість); гній великої рогатої худоби самосплавний (95% вологість); гній свинний природний (85% вологість); пташиний послід з клітки (75% вологість); пташиний послід підстилковий (60% вологість); солома; силос кукурудзяний; молочна сироватка (94% вологість); фруктовий і овочевий жом (80% вологість); зерно, борошно, хліб; буряковий жом (75% вологість); барда зернова (93% вологість); меляса; барда мелясна (90% вологість); мезга кукурудзяна (80% вологість); пивна дробина (82% вологість); мезга картопляна (91% вологість); жир з жироловок (жирова пульпа); жир (чистий, 0% вологість); коренеплідні овочі; відходи бійні; рибні відходи; технічний гліцерин; тверді побутові відходи.

Демонстрація методу прогнозування інтенсивності теплообміну за умов обмеженої інформації по теплофізичним властивостям з використанням регулярного теплового режиму здійснюється на прикладі оригінальної системи перемішування [5] з метою термостабілізації режиму роботи біогазового реактора. Рішення гідравлічних проблем в цій системі наводяться в [5, 6].

Для створення математичної моделі [5] гідравлічного розрахунку контуру з теплообмінником та ерліфтною тяговою ділянкою використано методу [7], адаптовану до умов роботи цього циркуляційного контуру (рис.1). Рівняння балансу рушійних сил та гідравлічних опорів і рівняння матеріальних балансів, на яких ґрунтується зазначена методика, були уточнені в [5] через особливості контуру з теплообмінником і ерліфтом пристроєм (тяговою ділянкою).

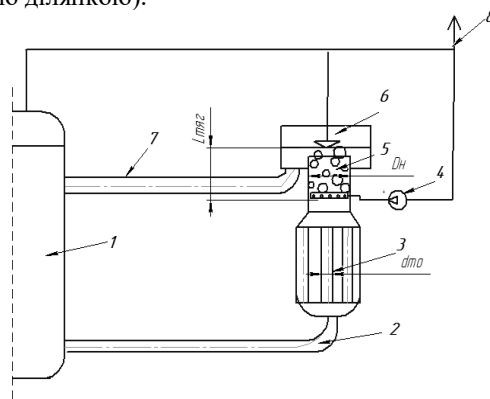


Рисунок 1 – Схема циркуляційного контуру з теплообмінником і тяговою ділянкою: 1 – реактор, 2 – прямий трубопровід, 3 – теплообмінник, 4 – нагнітач біогазу, 5 – надставка з тяговою ділянкою, 6 – сепаратор, 7 – зворотний трубопровід, 8 – у газгольдер.

Під час розрахунку теплових і гідродинамічних процесів [5] у контурі виникли проблеми по визначенню теплофізичних властивостей (ТФВ) субстрату.

Проблеми, що виникають під час математичного моделювання через складність прогнозування інтенсивності теплообміну в складних сумішах, вирішуються за допомогою експериментально-розрахункового методу (ЕРМ) [5, 8].

Математичне формулювання задач проектування теплотехнологічних систем можна записати в такому вигляді [3, 9, 10]

$$\begin{aligned}
 &\text{знайти} && K(X, Y(X), S_j, A) \\
 &\text{при} && B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\
 &&& P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\
 &&& X_{\min} \geq X \geq X_{\max}; Y_{\min} \geq Y \geq Y_{\max}; \\
 &&& S_j \in S_p; \quad S_p \subset S,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $K(X, Y(X), S_j, A)$ – функція мети; $B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – система балансових рівнянь; $P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – система рівнянь, що описують кінетичні процеси; $X_{\min} \geq X \geq X_{\max}; Y_{\min} \geq Y \geq Y_{\max}$ – система обмежень; X – сукупність незалежних змінних; Y – сукупність залежних змінних; S_j – j -та раціональна структура з кінцевої множини раціональних структур S_p , які є підмножиною можливої множини структур S ; A – зовнішні фактори [3].

В системі рівнянь кінетичні процеси – це процеси гідродинаміки і теплообміну в обладнанні біогазової установки.

Нам невідомі узагальнені критеріальні рівняння, які б описували великий клас задач в математичному моделюванні теплообміну в багатофазних багатокомпонентних середовищах, яке представляє субстрат.

Мета та завдання. Удосконалення методу прогнозування інтенсивності теплообміну в круглій трубі теплообмінника біогазового реактора, з використанням переходу від коефіцієнта тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра $\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}$ і досліджуваним рідинним середовищем до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2\text{T}}$.

Матеріал і результати досліджень. Для замикання математичної моделі по тепловому розрахунку в теплообміннику термостабілізації біогазового реактора наводиться алгоритм переходу від коефіцієнта тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра $\bar{\alpha}_2^{\text{PTP}}$ [11] і досліджуваним рідинним середовищем до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2\text{T}}$.

Дослідження проводяться на експериментальному стенді за умов вимушеної конвекції [3] в системі «навколишнє середовище I – тіло II», де «навколишнє середовище I» – вода, а «тіло II» – досліджуване рідинне середовище в тонкій металевій циліндричній оболонці.

Дослідження теплообміну в умовах вимушеної конвекції проводяться на експериментальному стенді, схема якого показана на рис.2: 1 – ізольована зовнішня посудина, 2 – навколишнє середовище (вода), 3 – ізольована металева кришка, 4 – пропелерна мішалка, 5 – внутрішня тонкостінна посудина, 6 – досліджуване рідинне середовище, 7 – запобіжник перетоку газового середовища над поверхнею води і поверхнею дослідної рідини. Температури навколишнього середовища 2 і досліджуваного рідинного середовища 6 заміряються по висоті у 10-ти точках. Дослідження проводяться до зрівняння температур $\pm 3 \dots 5^\circ\text{C}$ між водою 2 та досліджуваним рідинним середовищем 6. Далі проводиться обробка експерименту згідно методики вказаної в [3, 12]. Частота обертання n мішалки змінюється в межах 32-150 об/хв; діаметр пропелерної мішалки – 0,08 м.

Лабораторний експериментальний стенд розроблений на кафедрі теплоенергетики Вінницького національного технічного університету [3].

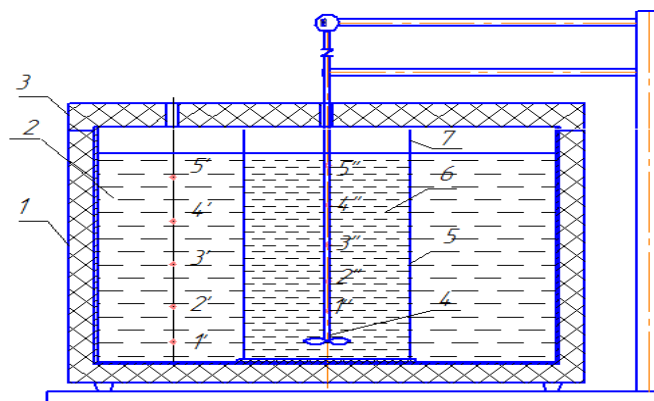


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки в умовах вимушеної конвекції

В роботі вивчається теплообмін багатофазного багатокомпонентного середовища – субстрату з реальної діючої біогазової установки, далі по тексту – субстрат. Зразок субстрату відібрано в системі біогазової установки перед подачею в біогазовий реактор. Відібраний субстрат складається з жому цукрового заводу, бадилля цукрових буряків, жмиху яблук та відходів птахофабрики.

При дослідженні в якості «модельних рідин» прийнято цукровий розчин масової концентрації сухих речовин $s = 50, 60, 70\%$ з відомими теплофізичними властивостями [13]. В результаті проведення експерименту одержано масив експериментальних даних на «модельних рідинах». В результаті чого з використанням програми *Statistica 6* виводиться критеріальне рівняння (рис.3) з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,98$.

$$\overline{Nu}_2 = 0,0038 \cdot Re^{0,742} \cdot Pr_p^{0,456} \cdot Ra^{0,141} \quad (2)$$

яке достовірне в межах $100 < Re < 14000$, $4 \cdot 10^5 < Ra < 3 \cdot 10^{15}$, $25 < Pr < 900$,

де Nu_2 – критерій Нуссельта; Re – критерій Рейнольдса; Ra – критерій Ралея, $Ra = Gr_2 \cdot Pr_2$; $Gr_2 = (g \cdot \beta_2 \cdot \overline{\Delta T} \cdot H^3) / \nu^2$ – критерій Грасгофа; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; β_2 – коефіцієнт температурного розширення досліджуваного рідинного середовища, $^\circ\text{C}^{-1}$; $\overline{\Delta T} = |\overline{T}_2 - \overline{T}_{\text{CT}}|$ – температурний напір, $^\circ\text{C}$ [16]; \overline{T}_2 – середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища, $^\circ\text{C}$; \overline{T}_{CT} – середня температура стінки тонкостінного металевого циліндра, $^\circ\text{C}$; Pr_p – критерій Прандтля для середньооб'ємної температури досліджуваного рідинного середовища; ν – кінематична в'язкість досліджуваного рідинного середовища, m^2/c ; H – визначальний лінійний розмір, м.

При отриманні критеріального рівняння на основі наших експериментів поправка $\left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{CT}}}\right)^{0,25}$ не була використана для врахування напрямку теплообміну. В наших експериментах поправка

$\left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$ оцінюється в межах 0,97-1,04 під час охолодження та нагрівання досліджуваного рідинного середовища.

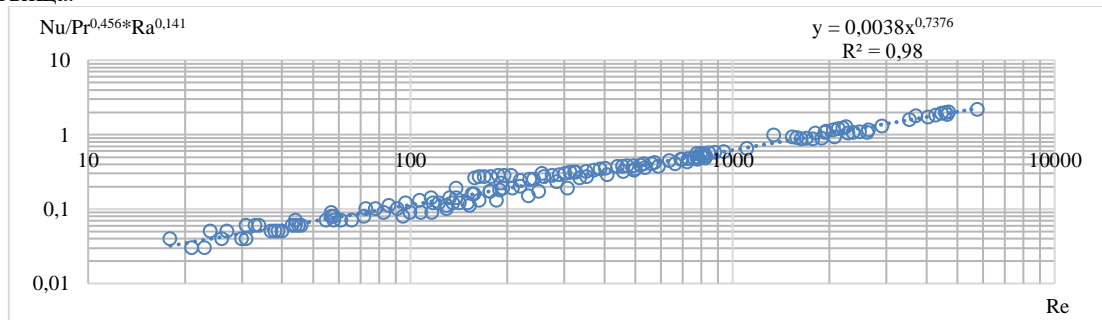


Рисунок 3 – Узагальнення експериментальних результатів

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння (2) приймає вигляд

$$\bar{\alpha}_2^{PTR} = 0,0038 \cdot \bar{w}^{0,742} \cdot l^{0,165} \cdot g^{0,141} \cdot \Delta T^{0,141} \cdot K_{ФВ(-v)} \cdot \nu^{-0,427}, \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}_2^{PTR}$ – коефіцієнти тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуваним рідинним середовищем, визначений методом регулярного теплового режиму (PTR) [11]; \bar{w} – умовна характерна швидкість на крайній точці пропелера, м/с; $l = 0,08$ м – діаметр мішалки; $K_{ФВ(-v)}$ – комплекс фізичних властивостей без врахування кінематичної в'язкості ν_2 досліджуваного рідинного середовища, $K_{ФВ(-v)} = \beta_2^{0,141} \cdot \rho_2^{0,597} \cdot C_{p2}^{0,597} \cdot \lambda_2^{0,403}$, β_2 – коефіцієнт температурного розширення, 1/К; ρ_2 – густина, кг/м³; C_{p2} – питома теплоємність, Дж/(кг·К); λ_2 – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі методом регулярного теплового режиму (PTR)

$$\bar{\alpha}_2^{PTR} = \frac{1}{\frac{1}{k_{експ}} + \frac{F \cdot \psi}{m \cdot C_{p1}}}, \quad (4)$$

де m – темп охолодження (нагрівання) в досліджуваному рідинному середовищі $m = (\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2) / (\tau_1 - \tau_2) = \text{const}$, де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища в циліндричній оболонці зі сторони води відповідно в моменти часу τ_1 і τ_2 , $\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$, °С; ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температур; де $K_{експ}$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); F – площа тонкостінного металевго циліндра, м²; C_{p1} – питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К).

На рис. 4 представлена залежність $K_{ФВ(-v)}$ від \bar{T}_2

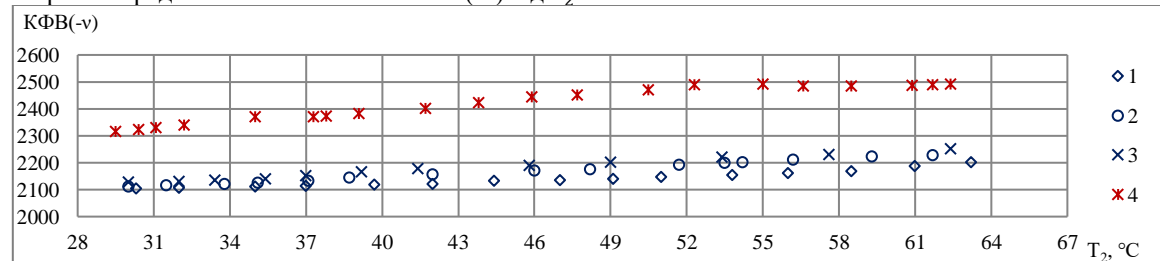


Рисунок 4 – $K_{ФВ(-v)}$ для «модельних рідин» в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції зі швидкістю руху $\bar{w} = 0,14$ м/с: 1 – цукровий розчин $c=50\%$; 2 – цукровий розчин $c=60\%$; 3 – цукровий розчин $c=70\%$; 4 – вода

Провівши аналіз, встановлено, що $K_{ФВ(-v)}$ незначно змінюється в діапазоні температур, характерних для біогазових технологій.

Згідно реструктуризованого рівняння (3) вводимо поправку на в'язкість $\Pi(v) = \nu^{-0,427}$.

$$\Pi(v) = \frac{K_{ФВ}}{K_{ФВ(-v)}}. \quad (5)$$

Після перетворення залежність (5) має наступний вигляд

$$\Pi(v) = \frac{\bar{\alpha}_2^{PTR}}{0,0038 \cdot \omega^{0,742} \cdot l^{0,165} \cdot \Delta T^{0,141} \cdot K_{ФВ(-v)}}. \quad (6)$$

На рис.5 наводиться співставлення поправки на в'язкість $\Pi(v)$ цукрового розчину $c=50, 60\%$ із довідників $\Pi(v)_r$ [17] та розрахованої поправки на в'язкість $\Pi(v)_a$ з використанням експериментально – розрахункового методу.

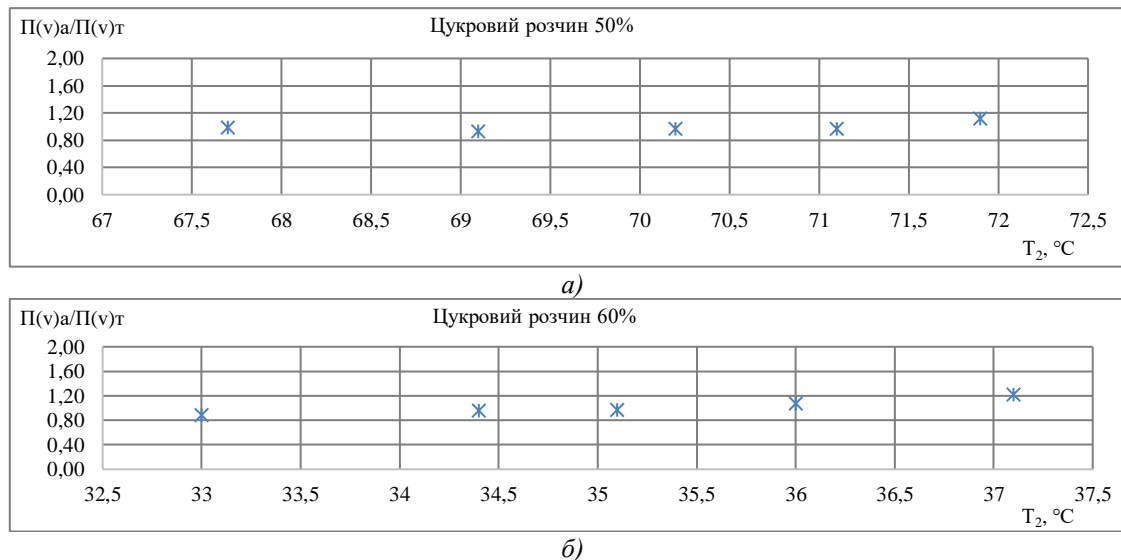


Рисунок 5 – Співставлення $P(v)_a$ і $P(v)_t$ в залежності від температури в умовах вимушеної конвекції: а) – цукровий розчин $c=50\%$; б) – цукровий розчин $c=60\%$

Цукровий розчин – однофазне середовище. При різному числі обертів, поправка на в'язкість повинна бути однакою $P(v) = f(T_2)$. Якщо не має ломки структури в рідині, або не має впливу двофазності, тоді число обертів, не повинно впливати на значення $P(v)$. Якщо є вплив двофазності при різних числах обертів – то можливо $P(v)_1 \neq P(v)_2 \neq P(v)_3$.

Досліджується теплообмін у субстраті в умовах вимушеної конвекції (рис.6).

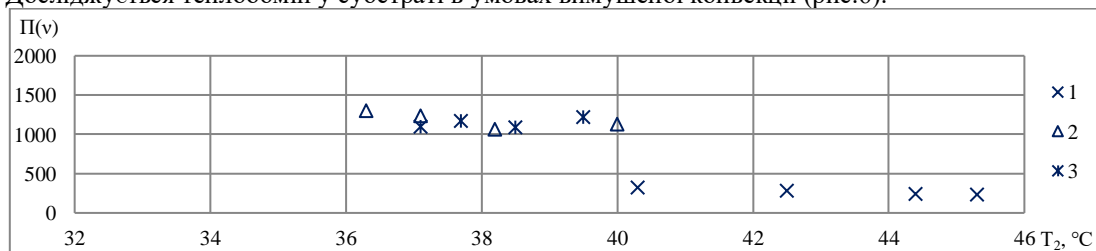


Рисунок 6 – Поправка $P(v)$ на в'язкість субстрату в залежності від температури з частотою обертання пропелерної мішалки n , об/хв : 1 – 96; 2 – 114; 3 – 156.

Якщо поправка на в'язкість $P(v)$ субстрату, при різному числі обертів, буде мати розбіжність не більше $\pm 40\%$, то дану поправку з наведеного алгоритму $P(v)$ використовуємо для переходу до поправки на в'язкість $P(v)'$ в круглій трубі.

Якщо ж поправка на в'язкість $P(v)$ субстрату, при різному числі обертів, буде мати розбіжність більше 40%, то дану поправку $P(v)$ розглядаємо, як поправку на в'язкість $(v^{1/n1})$ разом з поправкою на двофазність $P_{дф}$. Тоді будемо мати: $P(v) = (v^{1/n1}) \cdot (P_{дф})$.

Гіпотеза – наш метод переходу від коефіцієнта тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого циліндра і досліджуваним рідинним середовищем $\bar{\alpha}_2^{ртр}$ до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$ за умов руху цього ж середовища більш надійний, коли це середовище – однофазне (можна розглядати як гомогенне).

Далі використовуємо поправку на в'язкість $Pv = v^{-0,427}$ для переходу від коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_2^{ртр}$ до коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$. Робимо перехід від поправки на в'язкість з наведеного алгоритму $P(v) = (v^{1/n1})$ до поправки на в'язкість в круглій трубі $P(v)' = (v^{1/nт})$. Після чого прогнозуємо коефіцієнт тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$ (рис. 7).

Для прикладу розраховуємо сталеву трубу діаметром 50/57 мм, задаємося швидкістю руху рідинного середовища в трубі 0,4 м/с.

Прогнозуємо коефіцієнт тепловіддачі (рис.8) в круглій трубі для субстрату складає 1000 – 1500 Вт/(м²·К). Умова визначення коефіцієнта тепловіддачі в круглій трубі $\bar{\alpha}_{2т}$ – швидкість руху субстрату не більше 0,6 м/с, щоб не порушувався біотехнологічний процес.

Визначення інтенсивності тепловіддачі методом регулярного теплового режиму більш надійний, так як коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2^{ртр}$ визначається з використанням темпу охолодження (нагрівання) m і коефіцієнту нерівномірності розподілу температур ψ . В свою чергу, m і ψ характеризують увесь процес

теплообміну, визначаються всіма точками процесу, та мають високий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,97-0,99$. Завдяки цьому збільшується точність та якість визначення коефіцієнта тепловіддачі.

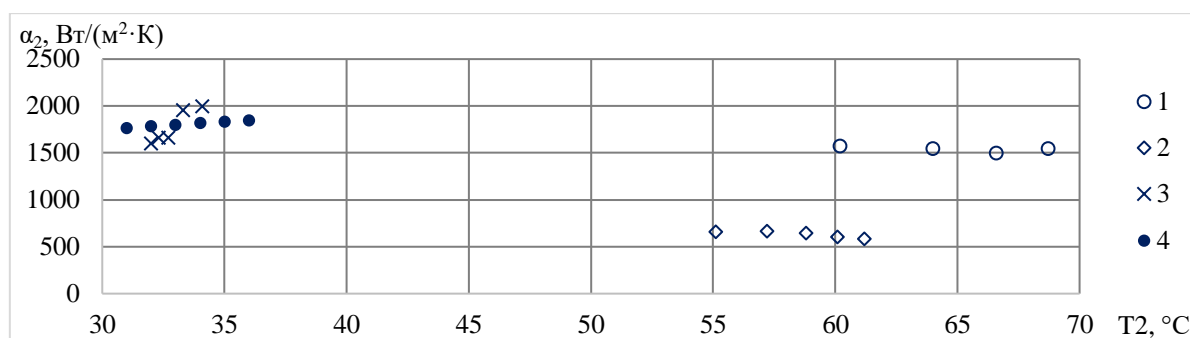


Рисунок 7 – Коефіцієнт тепловіддачі в круглій трубі в умовах нагрівання рідинного середовища: 1 – цукровий розчин $c=50\%$; 2 – цукровий розчин $c=60\%$; 3 – субстрат; 4 – вода

Висновки

1. В роботі виконано замикання математичної моделі проектування теплотехнологічних систем. Система рівнянь кінетичних процесів $[P_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0]$ доповнюється рівняннями, які визначають теплоперенос в теплотехнологічній системі.
2. З використанням експериментально розрахункового методу отримано критеріальне рівняння для прогнозування інтенсивності тепловіддачі в субстраті під час його нагрівання та охолодження в діапазоні температур біотехнологічного процесу на експериментальному стенді.
3. Приведений алгоритм для прогнозування інтенсивності тепловіддачі в елементах реального теплообмінного обладнання.
4. Наведений метод застосовується для тих випадків теплообміну для яких існують методи розрахунку в рідинах з відомими теплофізичними властивостями.

Список використаної літератури

1. Біогазове виробництво «по полицях» - Agrobiogas – Режим доступу: https://agrobiogas.com.ua/biogas_production_on_the_shelves/
2. Біогазові установки: економічна доцільність та перспективи на майбутнє – Режим доступу: <https://agroelita.info/biohazovi-ustanovky-ekonomichna-dotsilnist-ta-perspektyvy-na-maybutnie/>
3. Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 148 с.
4. Зорг Біогаз – Режим доступу: <https://zorg-biogas.com/biogaz/vyhod-biogaza>
5. Ткаченко С., Бочкова О., Степанова Н. Біогазова установка із системою циркуляційних контурів. *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*. 2017. № 4.
6. Ткаченко С. Й., Степанова Н. Д. Самозакипаючі потоки в дренажних каналах теплотехнологічних систем : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 160 с.
7. Балдина О. М., Локшин, А. В., Петерсон Д. Ф. Гидравлический расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) : Москва : Энергия. 1978. 256 с.
8. Ткаченко С., Пішеніна Н. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 3. С. 103 – 110.
9. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок : Москва : Энергия, 1978. 416 с.
10. Ткаченко Станислав Йосифович. Обобщенные методы расчета теплогидродинамических процессов и применение их для оптимизации выпарных установок: диссерт. ... доктора технических наук : 05.14.06 / Ткаченко Станислав Йосифович. – Вінниця, 1987. – 440 с.
11. Ткаченко С., Власенко О., Резидент Н. Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2021. № 2. С. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.
12. 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.
13. Колесников В.А., Нечаев Ю.Г. Теплосиловое хозяйство сахарных заводов: Москва : Пищевая промышленность. 1980. 392 с.

S.Y. Tkachenko, doc. technical Sciences, professor, ORCID 0000-0002-4654-2062

O.V. Vlasenko, researcher, ORCID 0000-0002-8975-0873

Vinnitsia National Technical University

PREDICTION OF THE INTENSITY OF HEAT RELEASE IN SUBSTRATES OF BIOGAS TECHNOLOGY

For our country, the development of energy saving and environmental protection technologies is at the development stage, therefore there is a need for an economically profitable determination of the intensity of heat exchange in a multi-phase multi-component environment, as there is a question in the production of energy-saving thermal power equipment.

The paper considers the heat exchange of the substrate from the operating biogas plant. In general, substrates consist of three phases, namely liquid (water and solution), solid (vegetable impurities, leaves, animal manure) and gas (biogas bubbles). The presence of various impurities in the mixture can change its rheological properties depending on the nature of the substrate and its context. In biogas technologies, different substrates have different thermophysical properties. The greatest difficulty is the measurement of thermal conductivity, other thermophysical properties can be estimated using existing methods.

To use the given method for predicting the intensity of heat transfer in substrates of biogas technology, the authors have accumulated observations and experimental results on an experimental stand on liquids with known thermophysical properties.

In biogas technologies, there is a problem of determining the intensity of heat exchange in multi-phase and multi-component environments, when solving it, it is advisable to use the theory of a regular thermal regime.

On the presented experimental stand, an array of information on "model fluids" with known information on thermophysical properties was obtained, on the basis of which the dependence on heat exchange is derived in a criterion form.

In the case under consideration, only a sample of a multiphase liquid medium, the thermophysical properties of which are limited, appears as initial data, only fragments of information can be found in the literature.

In the paper, only general recommendations are given regarding the determination of the intensity of heat exchange.

Key words: regular thermal regime, biogas, substrate, biogas installation, thermal stabilization, thermophysical properties, experimental and calculation method, mathematical model.

1. Biogas production "on the shelves" - Agrobiogas - Access mode: https://agrobiogas.com.ua/biogas_production_on_the_shelves/

2. Biogas plants: economic feasibility and future prospects - Access mode: <https://agroelita.info/biohazovistanovky-ekonomichna-dotsilnist-ta-perspektyvy-na-maybutnie/>

3. Tkachenko S.Y., Pishenina N.V. New methods for determining the intensity of heat exchange in organic waste processing systems: monograph. Vinnitsia: VNTU, 2017. 148 p.

4. Zorg Biogas - Access mode: <https://zorg-biogas.com/biogaz/vyhod-biogaza>

5. Tkachenko S., Bochkova O., Stepanova N. Biogas plant with a system of circulation circuits. Electronic journal Scientific works of VNTU. 2017. No. 4.

6. Tkachenko S.Y., Stepanova N.D. Self-boiling flows in drainage channels of heat-technology systems: monograph. Vinnitsia: UNIVERSUM-Vinnitsia, 2008. – 160 p.

7. Baldyna O. M., Lokshin, A. V., Peterson D. F. Hydraulic calculation of boiler units (normative method): Moscow: Energy. 1978. 256 p.

8. Tkachenko S., Pishenina N. Application of the concept of "model liquid" in the experimental-calculation method. Bulletin of the Vinnitsia Polytechnic Institute. 2012. No. 3. P. 103 – 110.

9. Popyrin L. S. Mathematical modeling and optimization of thermal power plants: Moscow: Energy, 1978. 416 p.

10. Stanislav Iosifovych Tkachenko. Generalized methods of calculation of thermohydrodynamic processes and their application for optimization of evaporation plants: dissertation. ... doctor of technical sciences: 05.14.06 / Stanislav Iosifovych Tkachenko. – Vinnitsia, 1987. – 440 p.

11. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident N. Heat exchange of a cylindrical liquid body of limited height with the environment. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment. 2021. No. 2. P. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

12. 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.

13. Kolesnikov V.A., Nechaev Y.G. Teplosilovoye hozyazyto sugar factories: Moscow: Pischevaya promyshlennost. 1980. 392 p.

Надійшла 30.10.2022

Received 30.10.2022