

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко

**БІОГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ.
РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2023

УДК 536.24:620.92

Т 48

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 25.05.2023 р.).

Рецензенти:

О. Ю. Черноусенко, доктор технічних наук, професор

А. П. Поляков, доктор технічних наук, професор

Ткаченко, С. Й.

Т 48 Біогазові технології. Регулярний тепловий режим : монографія [Електронний ресурс] / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 132 с.

ISBN 978-966-641-937-1

В монографії розглянуто методи прогнозування інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям. Встановлено існування регулярного теплового режиму за умов охолодження (нагрівання) системи «рідина-тверде тіло» в тонкій металевій циліндричній оболонці. Вдосконалено обробку експериментальних результатів і їх узагальнення сумісним використанням теорії подібності і методів регулярного теплового режиму.

При прийнятті рішень по прогнозуванню інтенсивності теплообміну з рідинами з невідомими теплофізичними властивостями використовується теорія регулярного теплового режиму, теорія подібності та експериментальні результати досліджень на експериментальному стенді.

УДК 536.24:620.92

ISBN 978-966-641-937-1

© С. Ткаченко, О. Власенко, 2023

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ | 5 |
| ВСТУП..... | 7 |
| 1 БАГАТОФАЗНІ ТА БАГАТОКОМПОНЕНТНІ СЕРЕДОВИЩА..... | 10 |
| 1.1 Аналіз біогазових технологій | 10 |
| 1.2 Використання експериментально-розрахункового методу | 12 |
| 1.3 Огляд багатофазних середовищ | 15 |
| 1.4 Проблеми визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних середовищах | 24 |
| 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ | 28 |
| 2.1 Експериментальна установка | 30 |
| 2.2 Методика проведення експериментів | 32 |
| 2.3 Визначення похибок розрахунків | 38 |
| 3 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ..... | 40 |
| 3.1 Нестационарна теплопровідність | 40 |
| 3.2 Регулярний тепловий режим | 43 |
| 4 РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ В СИСТЕМІ «РІДИНА-ТВЕРДЕ ТІЛО»..... | 48 |
| 4.1 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вільна конвекція | 48 |
| 4.2 Регулярний тепловий режим за умов дослідження однофазного середовища. Вимушена конвекція..... | 57 |
| 4.3 Регулярний тепловий режим за умов дослідження двофазного середовища .. | 60 |
| 4.4 Регулярний тепловий режим за умов дослідження багатофазного середовища | 66 |
| 4.5 Регулярний тепловий режим за умов дослідження гетерогенного рідкого середовища | 69 |
| 5 ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ | 76 |
| 5.1 Коефіцієнт тепловіддачі рідинного середовища за умов вільної конвекції ... | 76 |
| 5.2 Коефіцієнт тепловіддачі рідинного середовища за умов вимушеної конвекції | 80 |
| 5.3 Дослідження теплообміну рідинного середовища | 81 |
| 5.4 Визначення еквівалентної теплопровідності | 84 |
| 5.5 Дослідження нестационарного теплообміну в біогазових сумішах | 89 |
| 5.6 Переваги використання методу регулярного теплового режиму | 95 |

| | |
|---|-----|
| 6 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В БЮГАЗОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ..... | 101 |
| 6.1 Коефіцієнт тепловіддачі середовища за умов обмеженої інформації по теплофізичним властивостям | 101 |
| 6.2 Визначення коефіцієнту тепловіддачі в багатофазних неньютонівських середовищах | 110 |
| 6.3 Умови використання методу регулярного теплового режиму | 121 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 123 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|--------------------------------|--|
| БГУ | біогазова установка; |
| РТР | регулярний тепловий режим; |
| ТП | теорія подібності; |
| ТФВ | теплофізичні властивості; |
| ЕРМ | експериментально-розрахунковий метод; |
| КФВ | комплекс фізичних властивостей; |
| КФВ _б | базовий комплекс фізичних властивостей; |
| T, \bar{T} , $\bar{\bar{T}}$ | температура, °С; |
| $\overline{\Delta T}$ | середній температурний напір між стінкою і середовищем, °С; |
| θ | надлишкова температура, °С; |
| n | кількість фіксувань температур в одній серії |
| дослідів; | |
| | кількість обертів мішалки, об/хв; |
| w | швидкість руху середовища (рідини), м/с; |
| \bar{w} | умовна швидкість руху середовища (рідини), |
| м/с; | |
| H, h | висота теплообмінної поверхні, м; |
| 2δ | різниця діаметрів внутрішньої посудини і мішалки, м; |
| K | коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К); |
| W | вологість, %; |
| c | концентрація, %; |
| d, d _{екв} | діаметр, еквівалентний діаметр, відповідно, м; |
| M | маса, кг; |
| ρ | густина, кг/м ³ ; |
| ν | кінематична в'язкість, м ² /с; |
| μ | динамічна в'язкість, Па·с; |
| λ | коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); |
| C _p | питома теплоємність рідини, кДж/(кг·К); |
| g | прискорення вільного падіння, м/с ² ; |
| β | коефіцієнт температурного розширення, 1/К; |
| m | темп охолодження (нагрівання) тіла, с ⁻¹ ; |
| ψ | коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II; |
| $\bar{\alpha}_1$ | коефіцієнт тепловіддачі між водою (навколишнім середовищем і тілом II, Вт/(м ² ·К); |

$\overline{\alpha}_2$

коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуваним рідинним середовищем, Вт/(м²·К).

Верхні і нижні індекси:

| | |
|----|----------------------------------|
| 1 | вода (навколишнє середовище); |
| 2 | досліджуване рідинне середовище; |
| р | рідина; |
| ст | стінка; |
| б | базовий. |

ВСТУП

Розвиток біогазових технологій створює позитивний енергетичний, екологічний і соціальний ефекти. Розвиток ринку біогазу в Україні дозволить замістити 2,6...18 млрд м³ природного газу на рік, що сприятиме посиленню енергетичної безпеки країни, створенню нових робочих місць, економічному розвитку регіонів, дозволить покривати пікові навантаження в електромережі, утилізувати відходи рослинництва, а також деякі відходи харчової промисловості. Обов'язковим елементом тваринницьких, агропереробних, харчових підприємств можуть стати саме біогазові технології [1].

В біогазових технологіях одною із важливих і невирішених проблем є дотримання температурного режиму. Допустимі коливання температури у термофільному режимі складають до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити методи оцінки теплофізичних властивостей і інтенсивності теплообміну рідинних середовищ в біогазовій установці. Методів розрахунку теплообміну між складними сумішами і теплообмінною поверхнею недостатньо. Такі методи розвиваються, в яких експериментальні результати нестационарного теплообміну обробляються лише методами стаціонарного теплообміну, які апробовані та узагальненні [1, 2].

В даній роботі для обробки результатів експериментальних досліджень рекомендується залучити методи нестационарного теплообміну, методи регулярного теплового режиму, які розроблені лише для твердих тіл. Запропонований метод нестационарного теплообміну застосовується для тіл, які складаються з твердої і рідкої частини, в яких реалізується регулярний тепловий режим. На наш погляд є потреба детально дослідити процеси нестационарного теплообміну на експериментальній установці.

Сутність методу полягає в дослідженні теплообміну в «обмеженому об'ємі» при вільній, вимушеній конвекції і за допомогою теорії подібності перенесенні на процеси термостабілізації в біогазових установках. Методи регулярного теплового режиму дозволяють досліджувати речовини з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям.

Нам невідомі такі установки і експерименти на яких би досліджувався нестационарний теплообмін в «обмеженому об'ємі». В «обмеженому об'ємі» процеси нагрівання та охолодження рідини протікають поблизу один від одного і розділити їх неможливо, в цьому випадку тепловіддачу треба розглядати в цілому. Кількість результатів досліджень в «обмеженому об'ємі» для практичних запитів недостатня. В більшості дослідженнях результати неузагальнені і переважають емпіричні розрахунки.

Запропоновано використовувати експериментально-розрахунковий метод для математичного опису теплових процесів [3]. Це абсолютно новий підхід до використання теорії подібності. Існують біогазові установки з різноманітною конструкцією теплообмінних поверхонь, в обладнанні яких може застосовуватись велика кількість комбінацій сумішей. Тому для кожного конкретного випадку необхідно застосовувати свої підходи.

На сьогодні тема методів визначення інтенсивності теплообміну в багатофазових та багатокомпонентних середовищах є достатньо актуальною. Дані методи дозволяють створити сучасні системи переробки органічних відходів високо продуктивними, менш енерговитратними, менш матеріаломісткими, а також зменшити викиди в навколишнє середовище.

При вирішенні задач, часто невідомі теплофізичні властивості та хімічний склад сумішей, або вони змінюються під час переробки, тому для підвищення енергоефективності теплотехнологічного обладнання, необхідно вивчити та дослідити інтенсивність теплообміну в багатофазових та багатокомпонентних середовищах.

Біогаз – газ, який одержують водневим або метановим зброджуванням біомаси. Біогазові установки застосовуються для отримання біопалива першого покоління. Їх перевага – можливість корисної утилізації органічних відходів тваринництва, рослинництва, побутових відходів, стічних вод, тощо із позитивним енергетичним, екологічним, соціальним та економічним ефектом [2, 3]. Біогазові технології належним чином вписуються в доктрину ООН сталого розвитку суспільства. Згідно цієї доктрини відходи і побічні продукти одного виробництва (тваринництва, рослинництва тощо) є вхідними для біогазової установки (БГУ). А відходи БГУ використовуються як високоякісні добрива в сільському господарстві [2].

Згідно [2] наступні фактори відіграють вирішальну роль у виборі розміру та конструкції реактора: оптимальний об'єм різних типів біомаси при заповненні, ступінь ферментації субстрату як функція концентрації сухої речовини, простір для робочого завантаження біогазової установки, період часу ферментації та інтенсивність змішування, системи виробництва, рівні механізації та автоматизації. Температура вихідної сировини в реакторі повинна підтримуватися на рівні, оптимальному для функціонування відповідних анаеробних бактерій. Для безперебійної роботи БГУ необхідна автоматична система контролю, яка контролює всі параметри і підтримує задану температуру і режим роботи ферментатора, а також інтенсивність реакції. Робота системи керування базується на інформації, отриманій від кількох датчиків: датчика об'єму вхідної сировини, датчика температури сировини в реакторі, датчика рівня рідини сировини в реакторі та датчика виходу біогазу.

Таким чином, для вирішення проблеми на сучасному науковому рівні треба узгодити теплотехнологічні та біотехнологічні процеси. Для розв'язання цієї спряженої задачі на сьогодні явно недостатньо досліджень закономірностей тепло- і масообміну в складних рідинних середовищах [1, 5, 6, 7, 8].

Відомо, що експериментальні стенди для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в натурних теплообмінниках реальних виробництв, як правило, громіздкі, складні в організації навіть стаціонарних процесів теплообміну [9, 10]. А в умовах складних рідинних середовищ, коли теплофізичні властивості (ТФВ) і їх реологічне поведження можуть змінюватись в процесі експерименту, труднощі зростають в рази [1, 11].

1 БАГАТОФАЗНІ ТА БАГАТОКОМПОНЕНТНІ СЕРЕДОВИЩА

1.1 Аналіз біогазових технологій

Аналіз перспектив розвитку систем теплопостачання показує, що покриття теплових навантажень забезпечуватиметься за рахунок спалювання органічного палива [1].

У сучасних розвинених країнах світу на вироблення електричної енергії та тепла низького та середнього потенціалу витрачається основна частина видобутих паливно-енергетичних ресурсів [1].

Перспективні звичайні енергетичні технології підвищили ефективність використання енергії, але не покращили стан навколишнього середовища – термічне, хімічне та радіоактивне забруднення навколишнього середовища з потенційно катастрофічними наслідками. Негативна тенденція розвитку традиційної енергетики в основному зумовлена існуванням двох факторів – швидкого виснаження природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища. За даними ООН, очікується, що запаси вугілля будуть вичерпані між 2082-2500 роками. У зв'язку з цим, з одного боку, необхідно знайти можливості для раціонального використання традиційних енергоресурсів, а з іншого боку, необхідно розвивати науково-технічну роботу з використання нетрадиційної енергії та відновлюваної енергії [2].

Загострення екологічних проблем, виснаження запасів невідновлюваних енергоресурсів, зростання цін на них зумовили глобальний інтерес до розробки та використання технології біоконверсії органічних відходів для отримання енергії.

Відповідно до науково-технічних прогнозів на перспективу конверсія біомаси є найпоширенішим енергетичним ресурсом серед відновлюваних джерел енергії.

Інтенсивність процесу анаеробного зброджування значною мірою залежить від температурного режиму метантенку. Так, під час роботи метантенка в мезофільному режимі при температурі зброджування 37 °С допустиме коливання температур становить 2,8 °С, а при термофільному режимі (55 °С) - лише 0,3 °С [3]. Тому, щоб отримати

3. Теплообмін при $Re < 10000$ – між твердою стінкою і субстратом – дозволяє оцінити коефіцієнт тепловіддачі і тим самим в реальному проекті зупинитися і більш обґрунтовано вибрати форму поверхні і її розташування.

4. Умови застосування нашого методу – застосовується для тих випадків теплообміну для яких існують методи розрахунку в рідинах з відомими теплофізичними властивостями.

5. Наш метод не підходить, коли не має критеріальної залежності для плануємої теплообмінної поверхні.

6. Для того, щоб користуватися нашими методами потрібно мати усталені критеріальні залежності для цих умов теплообміну (в геометричному плані). Для умов теплообміну, який добре вивчений з застосуванням теорії подібності і описані критеріальні залежності. Тому при вирішенні наших питань ми висуваємо гіпотези, які пов'язані і витікають із теорії подібності конвективного теплообміну.

7. Наш метод складається із відомих залежностей для рідин із відомими теплофізичними властивостями і логічних припущень, які витікають із теорії подібності.

8. Для того, щоб використовувати наш метод ми накопичуємо спостереження і експериментальні результати на нашому експериментальному стенді на рідинах із відомими теплофізичними властивостями. І при прийнятті рішень по прогнозуванню інтенсивності теплообміну з рідинами з невідомими теплофізичними властивостями, використовується теорія регулярного теплового режиму, теорія подібності та експериментальні результати власних досліджень на стенді.

9. Переваги нашого методу [1]:

- щоб вивчити теплообмін необхідно мати громіздкі і багатовартісні стенди, на яких складно провести експерименти в порівнянні з представленим портативним експериментальним стендом;

- на нашому експериментальному стенді є можливість на порядок більше провести досліджень, ніж на стендах з літератури для цих же умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. В. Власенко, «Методи визначення інтенсивності теплообміну в багатофазних та багатокомпонентних середовищах» дис. док. філософ., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023.

[2] Г. Г. Гелетуша та ін. *Новітні технології біоенергоконверсії*. Київ, «Аграр Медіа Груп», 2010, 166 с.

[3] Г. Г. Гелетуша Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива : дис. докт. техн. наук : 05.14.08. Інститут технічної теплофізики НАН України. Київ, 2021. 329 с.

[4] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*. Вінниця : ВНТУ, 2017, 148 с.

[5] Д. В. Степанов, Ресурсощадні теплогідродинамічні процеси термостабілізації систем біоконверсії : дис. канд. техн. наук : 05.14.06. Київ, 2001. 183 с.

[6] Н. В. Резидент, Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.06. Нац. унів. харч. техн. Київ, 2009, 17 с.

[7] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Застосування поняття ‘модельна рідина’ в експериментально-розрахунковому методі», *Вісник ВПІ*. 2010. № 3. С. 103–110.

[8] Н. В. Пішеніна. Удосконалення методу визначення інтенсивності теплообміну в енергоефективних системах переробки органічних відходів : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.06 . Київ, 2013, 27 с.

[9] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Математичне моделювання робочих процесів в біогазовій установці», *Вісник ВПІ*. 2011. № 3. С. 40 – 47.

[10] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент, «Удосконалення експериментально-розрахункового методу», *Збірник технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. 2010. № 2. С. 171 – 183.

[11] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші. пат. 97021 Україна. №а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл. № 2. 5 с.

[12] С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, «Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності «Теплоенергетика». Вінниця : ВНТУ, 2018. 52 с.

[13] В. Елюхіна, В. Хисамов, В. Бескачко, «Об интерпретации реологических свойств водных растворов глицерина в экспериментах с капиллярным вискозиметром», *Материалы V Всероссийской*

конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям с участием иностранных ученых, 2004.

[14] О. Бердыев, Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза : автореф. дис. канд. техн. наук. Ашхабад, НПО «Солнце», 1989. 24 с.

[15] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, *Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії*. Вінниця : Універсум, 2011, 132 с.

[16] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі», *Вісник ВПІ*. 2012. № 3. С. 41-46.

[17] С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, «Метод визначення інтенсивності теплообміну в реостабільних сумішах», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2012. №13. С. 78–87.

[18] G. Geletukha, P. Kucheruk, Y. Matveev, «Prospects of biomethane production and use in Ukraine», *UABio Position Paper*. 2014. № 11.

[19] Ю. В. Куріс, І. Ф. Червоний, *Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2010, 488 с.

[20] *Відновлювані джерела енергії*,/ Під заг.ред. Кудрі С. О. – К. Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020, 393 с.

[21] Г. Гелетуха, П. Кучерук, Ю. Матвєєв, *Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні* : Аналітична записка. № 11. Київ, Біоенергетична асоціація України, 2014, 42 с.

[22] О. Скляр, Р. Скляр, «Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405 – 412.

[23] О. Скляр, Р. Скляр, «Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування», *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. №4. С. 3 – 9.

[24] D. Zema, A. Fòlino, G. Zappia, P. Calabrò, V. Tamburino, S. Zimbone. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: An environmentally sound way of citrus waste management in agroecosystems. *Science of The Total Environment*. 2018.

[25] B. Ecem Oner, C. Akyol, M. Bozan, O. Ince, S. Aydin, B. Ince. Bioaugmentation with *Clostridium thermocellum* to enhance the anaerobic biodegradation of lignocellulosic agricultural residues. *Bioresour Technol*. 2018.

[26] J. Lindmark, E. Thorin, R. Bel Fdhila, E. Dahlquist. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014.

[27] L. Tian, D. Zou, H. Yuan, L. Wang, X. Zhang, X. Li. «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.

[28] D. Klingenberg, T. Root, S. Burlawar, C. Scott, K. Bourne, R. Gleisner, et al. «Rheometry of coarse biomass at high temperature and pressure», *Biomass and Bioenergy*, 2017. P. 69-78.

[29] P. Kress, H. Nagele, H. Oechsner, S. Ruile, «Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters», *Bioresour Technol*, 2018. P. 1-6.

[30] 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.

[31] 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.

[32] H. M. El-Mashad, W. K. van Loon, G. Zeeman, G. P. Bot, «Rheological properties of dairy cattle manure», *Bioresour Technol*, 2005.

[33] A. Achkari-Begdouri, «Rheological Properties of Moroccan Dairy Cattle Manure», *Bioresour Technol*, 1992.

[34] A. Achkari-Begdouri, P. Goodrich, «Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure», *Bioresour Technol*, 1992. P. 149-156.

[35] L. Tian, F. Shen, H. Yuan, et al, «Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion», *Bioresour Technol*, 2014. P. 86-91.

[36] S. Viamajala, J. D. Mcmillan, D. J. Schell, et al, «Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size», *Bioresour Technol*, 2009.

[37] Категорії субстратів для біогазового виробництва. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agrobiogas.com.ua/categories-of-substrates-for-biogas-production/>

[38] Отримання біогазу та органічних добрив при анаеробній ферментації. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sites.google.com/site/otrimannabiogazu/>

[39] Г. Гелетука, П. Кучерук, Ю. Матвеев, «Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.uabio.org>

[40] С. Уминський, С. Інютин, «Продуктування біогазу та органічних добрив з відходів агровиробництва», *Техніка і технології АПК*. 2013. № 11. С. 19-24.

[41] С. Уминський, «Технології одержання біогазу і органічних добрив в агровиробництві», *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*, 2013. № 67, с. 167–176.

[42] C. Müller, «Anaerobic digestion of biodegradable solid waste in low- and middle-income countries», *Sandec report*, 2007, p. 7.

- [43] Biogas barometer. *Eurobserv'er*. November 2017.
- [44] S. Zareei, J. Khodaei, «Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system», *Renewable Energy*, 2017.
- [45] L. Tian, F. Shen, H. Yuan, et al, «Reducing agitation energy-consumption by improving rheological properties of corn stover substrate in anaerobic digestion», *Bioresource Technology*, 2014. P. 86-91.
- [46] S. Viamajala, J. Mcmillan, D. Schell, et al, «Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations – Effects of saccharification and particle size», *Bioresource Technology*, 2009.
- [47] K. Dehkordi, M. Fazilati, A. Hajatzadeh, «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.
- [48] 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.
- [49] I. Angelidaki, L. Ellegaard, «Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants», *Appl. Biochem. Biotechnol*, 2003.
- [50] В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло та інші, *Біопалива (технології, машини і обладнання)*, Київ, ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004, 256 с.
- [51] K. Stamatelatos, L. Syrou, C. Kravaris, G. Lyberatos, «An invariant manifold approach for CSTR model reduction in the presence of multi-step biochemical reaction schemes», *Application to anaerobic digestion*. Chem Eng. 2013.
- [52] Ю. І. Посудін, *Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища*. Київ, 2011, 340 с.
- [53] H. L. Smith, *Bacterial growth*. Arizona State University. 2007.
- [54] S. Schnell, P. K. Maini, Century of Enzyme Kinetics: Reliability of the KM and Vmax Estimates. *Comments on Theoretical Biology*. 2003. P. 169-187.
- [55] J. A. Robinson, J. M Tiedje, Nonlinear estimation of Monod growth kinetic parameters from a single substrate depletion curve. *Applied and Environmental Microbiology*. 1983. No 45(5). P. 1453-1458.
- [56] I. Angelidaki, L. Ellegaard, «Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants», *Appl. Biochem. Biotechnol*. 2003. No 109. P. 95–105.
- [57] H. B. Nielsen, Z. Mladenovska, P. Westermann, B. K. Ahring, «Comparison of two-stage thermophilic (68C/55C) anaerobic digestion with onestage thermophilic (55C) digestion of cattle manure», *Biotechnology and bioengineering*. 2004. No 86(3). P. 291-300.

[58] L. Hamelin, M. Wesnæs, H. Wenzel, B. M. Petersen, «Environmental consequences of future biogas technologies based on separated slurry», *Environmental science & technology*, 2011, No 45(13), P. 5869-5877.

[58] K. H. Hansen, I. Angelidaki, B. K. Ahring, «Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia», *Water Research*, 1998. No 32(1), P. 5-12.

[60] H. B. Nielsen, Z. Mladenovska, P. Westermann, B. K. Ahring, «Comparison of two-stage thermophilic (68 C/55 C) anaerobic digestion with onestage thermophilic (55 C) digestion of cattle manure», *Biotechnology and bioengineering*, 2004. No 86(3). P. 291-300.

[61] L. Hamelin, M. Wesnæs, H. Wenzel, B. M. Petersen, «Environmental consequences of future biogas technologies based on separated slurry», *Environmental science & technology*, 2011, No 45(13), P. 5869-5877.

[62] T. G. Poulsen, A. S. Nizami, R. Rafique, G. Kiely, J. D. Murphy, «How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants», *Applied Energy*, 2011, No 88(6), P. 2013-2018.

[63] P. Weiland, «Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany», *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2003. No 109(1-3), P. 263-274.

[64] ВНПТ-АПК-09.06. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною. «УкрНДІагропроект» Міністерства аграрної політики України, Київ, 2006, 100 с.

[65] И. В. Семенов, *Проектирование биогазовых установок*, Сумы: ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996, 347 с.

[66] Г. Г. Гелетука, Т. А. Железна, С. В. Драгнев, А. І. Баштовий, «Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні», *Промислова теплотехніка*, 2018. Т. 40, № 1, С. 68-74.

[67] О. А. Караїм, *Техноекілогічні основи безвідходних виробництв*. Луцьк: Вежа-Друк, 2014, 88 с.

[68] L. H. Page, J. Q. Ni, A. J. Heber, N. S. Mosier, X. Liu, H. S. Joo, J. H. Harrison, «Characteristics of volatile fatty acids in stored dairy manure before and after anaerobic digestion», *Biosystems Engineering*, 2014, P. 16-28.

[69] Z. Zhang, J. Zhu, «Characteristics of solids, BOD 5 and VFAs in liquid swine manure treated by short-term low-intensity aeration for long-term storage», *Bioresource technology*, 2006, No. 97(1), P. 140-149.

[70] H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, «Good Practice Guidance and Uncertainty», *Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Agriculture. CH₄ emissions from manure waste. 2006. P. 339-348.

[71] K. L. Conn, E. Topp, G. Lazarovits, «Factors influencing the concentration of volatile fatty acids, ammonia, and other nutrients in stored

liquid pig manure», *Journal of environmental quality*. 2007. No 36(2). P. 440-447.

[72] R. Braun, P. Weiland, A. Wellinger, «Biogas from energy crop digestion», *In IEA Bioenergy Task*, 2008, Vol. 37. P. 1-20.

73 T. Amon, V. Kryvoruchko, B. Amon, «Methane production from maize, grassland and animal manures through anaerobic digestion», *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety II*. 2004. P. 175-182.

[74] J. Bartuševics, Z. Gaile, «Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production», *In Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, Research for rural development 2010*, Jelgava, Latvia, 19-21 May 2010. Vol. 1. P. 42-47.

[75] B. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer, L. Gruber, «Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield», *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007. P. 173-182.

[76] M. Heiermann, M. Plöchl, B. Linke, H. Schelle, C. Herrmann, «Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion». *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1087*. 2009. Vol. XI.

[77] Г. Ратушняк, К. Анохіна, *Обґрунтування технологічних параметрів біогазових установок*. Вінниця, ВНТУ, 2011, 24 с.

[78] A. Ward, P. Hobbs, «Holliman Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources», *Bioresource Technology*. 2008. No 99. P. 7928 – 7940.

[79] С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, *Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки*. Вінниця, Універсум, 2004, 132 с.

[80] Біогазова установка: пат. 51209А Україна. №2002010796; заявл. 31.01.02; опубл. 15.11.02, Бюл. № 11.

[81] Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв, *Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси*. Вінниця, ВНТУ, 2017, 84 с

[82] Г. Гелетуха, П. Кучерук, Ю. Матвєєв, Т. Ходаковская, «Перспективы производства биогаза в Украине», *Возобновляемая энергетика*, 2011. № 3. С.73-77.

[83] Т. А. Железна, С. В. Драгнєв, А. І. Баштовий, «Можливості заготівлі агробіомаси та виробництва біопалив з неї комунальними підприємствами в Україні», *Теплофізика та теплоенергетика*, 2019, т. 41, № 2, с. 88-96. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.12>.

[84] Н. Михайлив, «Основные принципы технико-экономической и экологической оценки нетрадиционных и возобновляемых источников энергии», *Нові технології та інвестиції США в енергетичний сектор України: III міжнародна конференція «EnerCon - 97»*. Київ, 1997. С. 78.

[85] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші: пат. 105399 Україна. №а201204878; заявл. 25.10.2013; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9. 20 с.

[86] Спосіб визначення реостабільності сумішей з невизначеними теплофізичними властивостями в реальних теплогідродинамічних, біо-і хіміко-технологічних процесах: пат. 110718 Україна. № u201314369; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. 12с.

[87] S.Tkachenko, O.Vlasenko, N.Resident, D.Stepanov, N.Stepanova, «Cooling and heating of the fluid in the cylindrical volume», *Acta Innovations*, 2021, No. 42, P. 15-26. doi: 10.32933/ActaInnovations.42.2.

[88] И. М. Федоткин, С. Й. Ткаченко, *Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах*, Київ, Техніка, 1975, 212 с.

[89] Г. Б. Фройштетер, С. Ю. Данилевич, Н. В. Радионова, *Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах*, Киев, Наукова думка, 1990, 216 с.

[90] С. Й. Ткаченко, Т. Ю. Румянцева, Н. В. Пішеніна, «Визначення параметрів «віртуальної модельної рідини» для оцінки інтенсивності теплообміну в реальних умовах тепло технології», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2014. № 1(35), с. 27–35.

[91] М. А. Приходько М. А. Герасимчук, Г. Г. Герасимов, *Термодинаміка та теплопередача*, Рівне, НУВГП, 2008, 250 с.

[92] Р. В. Луцик, *Тепломасообмін*, Київ, КНУТД, 2004, 126 с.

[93] В. Й. Лабай, *Тепломасообмін*, Львів, Тріада Плюс, 1998, 260 с.

[94] А. И. Погорелов, *Тепломассообмен (основы теории и расчета)*, Одесса, Черноморье, 1999, 128 с.

[95] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, «Перспективи використання методів регулярного режиму для визначення інтенсивності теплообміну в обмеженому об'ємі», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, 2017, Том 23 № 2, с. 106-112.

[96] О. В. Власенко, «Дослідження теплообміну в об'ємі двофазної рідини за умов вимушеної її конвекції», *Вісник ВПІ*, 2021, № 6, с. 14-20.

[97] А. І. Погорелов, *Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку)*, Львів, «Новий світ - 2000», 2004, 144 с.

[98] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, К. О. Іщенко, «Еквівалентна теплопровідність в циліндричному об'ємі з розчином», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, 2018. Том 24 № 1. С. 106-110.

[99] А. Федоров, та ін., «Експериментальні дослідження інтенсивності теплообміну у в'язких багатокомпонентних багатофазних середовищах», *Вісник Міжнародної академії холоду*, 2020, № 4 (77), С. 91-99.

[100] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. В. Резидент, «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>.

[101] С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко, Н. Д. Степанова, Є. О. Павлович, «Нестаціонарний теплообмін у вертикальному циліндричному об'ємі, заповненому рідиною», *Вісник ВПІ*, 2022, № 1. С. 16–20.

[102] Д. І. Денесяк, «Нестаціонарний теплообмін у системі «вода-стінка-в'язка рідина», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. № 7. С. 34–38.

[103] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк, «Перспективи використання методів регулярного режиму для визначення інтенсивності теплообміну в обмеженому об'ємі», *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві*, Вінниця, 2017, № 2 (23), С. 106–112.

[104] Н. І. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сорокова, Ю. Н. Кольчик, «Метод численного моделирования тепло- и массообмена при трехмерном ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения», *Наукові праці ОНАХТ*, 2013, Том 1, Вип. 43, С. 20–25.

[105] В. О. Календер'ян, *Методи дослідження процесів теплообміну. Експериментальні методи. Частина 2*, Одеса, ОДАХ, 2006, 75 с.

[106] С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк Ефективний коефіцієнт теплопровідності за умов теплообміну в обмеженому просторі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/16961/>

[107] М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик, *Основи метрології та виміральної техніки*, Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005, Т. 1. Основи метрології, 532 с.

[108] Біогазова установка з однопрохідним біореактором з локальним фрагментом багатократної циркуляції : пат. 147423 Україна. № u202007986; заявл. 14.12.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18. 5 с.

[109] С. Ткаченко, О. Бочкова, Н. Степанова, «Біогазова установка із системою циркуляційних контурів», *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*, 2017, № 4.

[110] Д. В. Риндюк, В. А. Пешко, *Математичне моделювання теплових процесів в енергетиці та промисловості*. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, 75 с.

[111] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, «Тепловіддача до багатогомпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 2006, № 1, С. 111–114.

[112] С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, «Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії»,

Електронний журнал Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка, 2009, № 2.

[113] Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші: пат. 24616 Україна. № 200701190; заявл. 05.02.07; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

[114] Н. В. Резидент, «Застосування експериментально-розрахункового методу при розробці теплообмінного обладнання біоконверсії», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 2009, № 2, С. 233–237.

[115] В. А. Колтунов, Є. В. Белінська, *Технологія зберігання продовольчих товарів*, Київ, ЦУЛ, 2014, 138 с.

[116] И. В. Семененко, *Проектирование биогазовых установок*, Київ, Техника, 1992, 346 с.

[117] Г. А. Никитин, *Метановое брожение в биотехнологии*, Київ : Вища школа, 1990, 207 с.

[118] S. Tkachenko, K. Ischenko, N. Resident and other. *The intensity of heat exchange in complexes of organic waste disposal. Biomass as Raw Material for the Production of Biofuels and Chemicals*. November 1. 202. 240 Pages.

*Наукове електронне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Ткаченко Станіслав Йосипович
Власенко Ольга Володимирівна**

БІОГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ. РЕГУЛЯРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до видання 12.07.2023 р.
Зам № P2023-062.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.
press.vntu.edu.ua; *email*: irvc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.