

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна

**НОВІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ
ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ
В СИСТЕМАХ ПЕРЕРОБКИ
ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 536.24:620.92

T48

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.06.2014 р.)

Рецензенти:

С. М. Василенко, доктор технічних наук, професор

І. Н. Дудар, доктор технічних наук, професор

Ткаченко, С. Й.

T48 Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 148 с.

ISBN 978-966-641-699-8

В монографії розглянуто теплообмінні процеси в реонестабільних не-ньютонівських рідинах, методи визначення інтенсивності теплообміну в елементах енергоефективних систем переробки органічних відходів, методи синтезу систем. Дістали подальший розвиток методичні основи математичного моделювання системи виробництва енергоносіїв із органічних відходів завдяки застосуванню удосконаленого експериментально-розрахункового методу визначення інтенсивності теплообміну в складних рідинах та сумішах і введенню техногенного навантаження в перелік функцій якості системи.

УДК 536.24:620.92

ISBN 978-966-641-699-8

© С. Ткаченко, Н. Пішеніна, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
1 МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГОНОСІЇВ ІЗ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ	10
1.1 Система переробки органічних відходів	10
1.2 Математичний опис теплообмінних процесів в елементах системи	16
1.3 Проблема визначення теплофізичних властивостей складних сумішей	23
1.4 Методи визначення інтенсивності теплообміну в елементах системи	30
1.4.1 Традиційні підходи: теоретичні, експериментальні	30
1.4.2 Нетрадиційні підходи, експериментально-розрахунковий метод	38
1.5 Формування концепції експериментально-розрахункового методу дослідження теплообміну в неньютонівських реонестабільних сумішах	45
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ	50
2.1 експериментальна установка для дослідження теплообміну в умовах вільної конвекції	50
2.1.1 Удосконалена базова експериментальна установка. Методика проведення дослідів	50
2.1.2 Методика обробки експериментальних даних	52
2.1.3 Дослідження закономірностей теплообміну в елементах експериментального стенда	56
2.1.4 Уточнення критеріальних рівнянь, що описують закономірності теплообміну в елементах експериментального стенда	63
2.1.5 Дослідження теплофізичних властивостей натурної суміші на базовій експериментальній установці	66
2.1.6 Оцінювання очікуваних похибок і невизначеностей	69
2.2 Експериментальна установка для дослідження теплообміну в умовах вимушеної конвекції	70
2.2.1 Установка. Методика проведення дослідів	70

2.2.2 Уточнення критеріальних рівнянь для опису закономірності теплообміну в елементах експериментального стенда.....	72
2.2.3 Методика обробки експерименту	75
2.2.4 Оцінювання очікуваних похибок вимірювання та невизначеностей.....	76
3 ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ В НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ СУМІШАХ.....	78
3.1 «Модельна рідина» в ЕРМ.....	78
3.2 Аналіз та порівняння теплофізичних властивостей потенційних «модельних рідин»	87
3.3 Практичне застосування поняття «модельна рідина» в ЕРМ	90
3.4 Реонестабільні тиксотропні суміші	97
3.4.1 Теплообмін в умовах базового експериментального стенда.....	97
3.4.2 Метод переходу із базових в натурні умови теплообміну.....	104
3.4.3 Застосування експериментально-розрахункового методу для визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних тиксотропних рідинах в натурних умовах	112
3.5 Межі і особливості застосування експериментально- розрахункового методу	115
3.6 Практична реалізація нових методів визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

СПОВ	система переробки органічних відходів;
БГУ	біогазова установка, варіант СПОВ;
НТОУ	натурна теплообмінна установка;
ТН	техногенне навантаження на навколишнє середовище;
ЖЦ	життєвий цикл системи (LC);
ВРХ	велика рогата худоба;
ТФВ	теплофізичні властивості;
ЕРМ	експериментально-розрахунковий метод;
КФВ	комплекс фізичних властивостей;
КФВ _б	комплекс фізичних властивостей в базових умовах теплообміну
ЕКФВ	еквівалент комплексу фізичних властивостей;
ЕКФВ _б ^{експ}	експериментальний еквівалент комплексу фізичних властивостей в базових умовах теплообміну;
ЕКФВ _{ЕРМН}	еквівалент комплексу фізичних властивостей в натурних умовах теплообміну, визначений за ЕРМ;
$\left[\text{КФВ}_6^{\text{розра}} \right]_M$	розрахунковий комплекс фізичних властивостей «модельної рідини» для базових умов теплообміну;
$\Pi_{\text{нт.б}}, \Pi_{\text{нт.н}}$	поправка врахування впливу напряму теплообміну на коефіцієнти тепловіддачі в базових та натурних умовах теплообміну, відповідно;
$\Pi_{\text{б-н}}$	поправка переходу з базового в натурні умови теплообміну;
α_1	розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія (води) до стінки, Вт/(м ² ·К);
$\alpha_{\text{експ}}^{\text{б}}, \alpha_2$	коефіцієнт тепловіддачі в базових умовах теплообміну від твердої стінки до натурної (досліджуваної) суміші, Вт/(м ² ·К);
$\alpha_{\text{НТОУ}}, \alpha_{\text{ЕРМ}}$	коефіцієнт тепловіддачі для заданих умов теплообміну в НТОУ, Вт/(м ² ·К);
k	коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К);
W	вологість, %;

b	концентрація, %;
$d, d_{\text{екв}}$	діаметр, еквівалентний діаметр, відповідно, м;
ρ	густина, кг/м ³ ;
ν	кінематична в'язкість, м ² /с;
μ	динамічна в'язкість, Па·с;
t	температура, °С;
λ	коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
C_p	теплоємність рідини, кДж/(кг·К);
g	прискорення вільного падіння, м/с ² ;
β	коефіцієнт температурного розширення, 1/К;
n	кількість фіксувань температур в одній серії дослідів;
	кількість обертів мішалки, об/хв;
$\frac{w}{w}$	швидкість руху суміші (рідина), м/с;
\bar{w}	умовна характерна швидкість руху суміші (рідина), м/с
$\bar{\Delta t}$	середній температурний напір між стінкою і середовищем, °С;
δ	відстань між теплообмінними поверхнями;
	товщина стінки, м;
2δ	різниця діаметрів внутрішньої посудини і мішалки, м;
H, h	висота теплообмінної поверхні, м;
$Ra_h = Gr_h \cdot Pr$	критерій Релея;
$Gr_h = (g \cdot \beta \cdot \bar{\Delta t} \cdot H^3) / \nu^2$	критерій Грасгофа.
	Верхні і нижні індекси:
1, 2	зовнішня і внутрішня порожнини установок базового експериментального стенда відповідно;
с, р	суміш, рідина відповідно;
в	вода, визначальний;
ст	стінка;
нс	навколишнє середовище;
б	базовий;
н	натурний;
м, мр	модельна рідина;
чмр	частково–модельна рідина;
із	ізоляція.

ВСТУП

У технологічних процесах харчової, спиртової, переробної промисловості, сільського господарства, потрібно нагрівати, охолоджувати, термостабілізувати складні суміші, розчини органічного походження, біотехнологічні (мікробіологічні) середовища. Зокрема, діючі сьогодні вітчизняні системи переробки органічних відходів (СПОВ) характеризуються невисокою продуктивністю, значними енерговитратами на власні потреби, високою матеріаломісткістю, що призводить до підвищення техногенного навантаження на навколишнє середовище в процесі виготовлення, експлуатування та утилізації таких систем. Існуючі методи створення теплотехнологічних систем не дозволяють здійснити усунення цих недоліків.

Проблема ускладнюється у зв'язку з тим, що інформація про теплофізичні та реологічні властивості, хімічний склад натурних рідин та сумішей обмежена, крім того, їх властивості змінюються в процесі переробки та в залежності від передісторії. Для підвищення продуктивності та енергоефективності теплотехнологічного обладнання треба вирішити питання визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах. Розв'язання цієї проблеми в достатньому обсязі неможливе, тому що, зокрема, не вирішені на науковому рівні питання визначення інтенсивності теплообміну до складних органічних рідин, сумішей, субстратів.

В монографії поставлене питання розглянуто стосовно систем переробки органічних відходів. Підвищення енергоефективності, зниження ресурсоемності та техногенного навантаження на навколишнє середовище систем переробки органічних відходів є можливим шляхом теоретичного і експериментального обґрунтування їх синтезу, удосконалення способів і методів математичного і фізичного моделювання теплообмінних процесів у елементах систем.

У першому розділі монографії викладені методичні основи синтезу систем переробки органічних відходів, представлено проблему визначення теплофізичних властивостей складних, здебільшого не ньютонівських реонестабільних сумішей. Наведено результати аналізу традиційних теоретичних і експериментальних підходів вирішення питань оцінки інтенсивності теплообміну у складних сумішах, а також нетрадиційних. Одним із нетрадиційних підходів є запропонований на кафедрі теплоенергетики Вінницького національного технічного університету експериментально-розрахунковий метод визначення інтен-

сивності теплообміну в складних сумішах (ЕРМ), який отримав розвиток. У розділі показано, що започаткований метод має перспективу, але для широкого практичного застосування методу потрібно провести подальші наукові розробки. На прикладі реонестабільних сумішей показано, що в елементах натурних об'єктів систем переробки органічних відходів суміші органічного походження на основі відходів тваринництва знаходяться в таких умовах, коли реонестабільна суміш поводить себе як стабільна ньютонівська рідина. Ґрунтуючись на цьому, наведено формування концепції експериментально-розрахункового методу дослідження теплообміну в неньютонівських реонестабільних сумішах.

Таким чином, для створення замкнених математичних моделей необхідним є практичне використання експериментально-розрахункового методу. Основною метою наукових робіт, що систематизовані у монографії, є розвиток оригінального експериментально-розрахункового методу визначення інтенсивності теплообміну в складних середовищах, що є актуальним.

У другому розділі представлені результати власних експериментальних та аналітичних досліджень, наведено опис модернізованих експериментальних установок, методів проведення дослідів та обробки експериментальних даних, оцінку очікуваних похибок та невизначеностей. Також наведено результати досліджень закономірностей теплообміну в елементах експериментального стенда, уточнення критеріальних рівнянь, що описують закономірності теплообміну. Набуло подальшого розвитку уявлення про закономірності теплообміну ньютонівських та неньютонівських рідин та сумішей, за властивостями близькими до ньютонівських, в посудині з розмірами (згідно з існуючими уявленнями про теплообмін) на межі «великий об'єм»–«обмежений об'єм» у разі вільної і вимушеної конвекції в умовах макрородинамічної і теплової нестабільності. В результаті експериментальних досліджень, встановлено, що:

– закономірності теплообміну в умовах вільної конвекції можна описати критеріальними рівняннями зі структурою, яка відповідає рівнянням теплообміну у «великому об'ємі» зі квазістабільною вільною конвекцією ньютонівської рідини;

– закономірності теплообміну в умовах вимушеної конвекції можна описати критеріальними рівняннями з безрозмірними визначальними параметрами ньютонівської рідини, які враховують вплив вимушеної (Re) і вільної конвекції ($Gr \cdot Pr$) на інтенсивність теплообміну.

У третьому розділі наведено удосконалений експериментально-розрахунковий метод визначення інтенсивності теплообміну між металевою стінкою і складними сумішами, для яких інформація про теплофізичні властивості невідома. Показано розвиток поставленої гіпотези оцінки інтенсивності теплообміну в реонестабільних неньютонівських складних сумішах. Відповідно до гіпотези, за певних умов теплообмінні процеси в неньютонівських реонестабільних тиксотропних сумішах можна описати критеріальними рівняннями для ньютонівських рідин і використати традиційні безрозмірні критерії, без введення реологічних параметрів n і k та без поправок на реологію (за Кутателадзе). А також при побудові алгоритму функціонування ЕРМ використати той факт, що складна тиксотропна суміш може мати декілька «модельних рідин» в залежності від ступеня зруйнованості структури. «Модельна рідина» – це однорідна ньютонівська рідина (розчин, суміш), яка за своїми фізичними властивостями та впливом на інтенсивність теплообміну еквівалентна складній суміші.

У розділі подано удосконалену методику проведення дослідів з врахуванням передісторії суміші а також результати експериментів, які дозволили встановити залежність інтенсивності теплообміну від передісторії суміші. Показано розроблений метод врахування впливу напряду теплообміну на інтенсивність тепловіддачі та метод переходу з базових в натурні умови теплообміну завдяки науковому обґрунтуванню понять «модельної рідини» і «частково-модельної рідини» і запропонованих методів їх вибору.

Показано встановлені межі і особливості застосування і практичну реалізацію нових методів визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів

Наведено експериментальне підтвердження можливості застосування удосконаленого експериментально-розрахункового методу для дослідження інтенсивності теплообміну на прикладі рідкого гною та субстратів великої рогатої худоби, свиней, які є характерними представниками тиксотропних реонестабільних рідин.

Запропоновані нові експериментальні і теоретичні методи досліджень, дозволяють за результатами експериментальних досліджень коефіцієнтів тепловіддачі в базових експериментальних установках оцінювати коефіцієнти тепловіддачі в натурних елементах систем переробки органічних відходів.

Матеріали, що викладені в монографії, можуть слугувати основою для розробки і вдосконалення систем переробки органічних відходів, підвищення їх енергетичної і екологічної ефективності.

1 МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГОНОСІЇВ ІЗ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

1.1 Система переробки органічних відходів

Кожне господарство, де є відходи органічного походження, повинно вирішувати питання їх утилізації. Переробка відходів існуючими методами є неефективною, потребує багато енергетичних затрат і часто є шкідливою для здоров'я людини [1, 2]. Тому питання розробки високоефективних енергозберігаючих та природоохоронних методів утилізації і обґрунтованого синтезу систем переробки органічних відходів (СПОВ), в подальшому «система», є актуальним. Органічні відходи умовно можна поділити на тверді та рідкі. На даний час велика увага приділяється біологічним методам переробки органічних відходів з додатковим виробленням альтернативного джерела енергії – біогазу, які значно покращують екологічний стан довкілля. СПОВ класифікуються за методами переробки [3–12]:

- аеробна переробка твердих відходів;
- аеробне очищення стоків;
- анаеробна переробка твердих відходів і стоків.

Процес анаеробної переробки відходів є одним із найбільш перспективних методів утилізації, в результаті чого отримуємо екологічний, енергетичний, економічний ефекти, ефект від виробництва шламу; ефект від повторного використання води [13–21]. Біогазові технології вирішують низку соціально-економічних і природоохоронних завдань: економію і комплексність використання паливно-енергетичних та інших природних ресурсів (земельних і водних); створення нових інтенсивних технологій виробництва сільськогосподарської продукції поза залежністю від погодно-кліматичних умов; зниження негативного впливу теплового забруднення на навколишнє середовище. Особливість біогазових технологій в тому, що вони не є чисто енергетичними, а представляють комплекс, що охоплює рішення як енергетичних, так і екологічних, агрохімічних, лісотехнічних та інших питань, і в цьому полягає їхня висока рентабельність і конкурентоздатність [11, 22, 23].

Рідкі органічні відходи, що підлягають утилізації в СПОВ: відходи харчової промисловості (відходи переробки картоплі, виробництва чіпсів – шкурки, кавова пульпа, буряковий жом, фруктові макухи, ягідні,

овочеві, виноградні вичавки, водорості); тверді побутові відходи (папір, картон, текстиль, харчові відходи); відходи тваринництва, птахівництва, свинарства; відходи виробництва біодизелю (технічний гліцерин від виробництва біодизелю з рапсу); рослинні відходи (відходи рослин: силос, прогниле зерно, трава, солома листя, ботвиння, лузга); відходи м'ясокомбінату і рибної промисловості; промислові стоки (мелясна барда, стоки виробництва пива, стоки молокозаводів, сироватка, стоки забійного і рибного цехів, відходи виробництва крохмалю і патоки – мезга і сироп), побутові стоки, фекальний осад, жири, садові відходи, солодовий осад, вичавки, спиртова барда, буряковий жом, суміші відходів у різному співвідношенні [24–31].

Анаеробні СПОВ класифікуються за типами технологій метанової переробки відходів [16, 20, 32], видами технологічних схем [32–34]; за розміщенням і конструктивним рішенням основних елементів СПОВ [5, 6, 35–41]; за призначенням [1, 2, 16].

Отже, варіантів енергетичних СПОВ є багато, кожна має свої переваги та недоліки. Тому доцільним є створення енергоефективної системи переробки органічних відходів, яка буде включати їх основні переваги. Для цього необхідно детально розглянути схемні рішення відомих енергозбережних СПОВ. У нашій роботі приділяється увага системам анаеробної переробки рідких органічних відходів, на прикладі біогазової установки (БГУ).

БГУ розглядається як складна система, яка поділяється на елементи і характеризується складом елементів, топологією і режимами роботи [42]. Конструктивні і технологічні особливості БГУ визначають різні фактори і, в першу чергу, сировина, її властивості і попередня обробка, а також тепловологісний режим, спосіб завантаження і збродження субстрату, наявність матеріалів і низка інших факторів [1, 6, 24, 32, 33, 43]. У результаті огляду схемних вирішень діючих БГУ різної конструкції проведено аналіз і деструктуризацію схем та виділено основні елементи СПОВ БГУ [42, 44]: реактор, елемент перемішування, завантаження – вивантаження; тепло генератор, підготовка сировини, когенераційна установка, елемент термостабілізації реактора, елемент відбору біогазу, підготовка біогазу, тепло утилізація, обробка і зберігання відпрацьованої суміші, підготовка технологічної води

Із проаналізованих схем БГУ, які споруджені в Україні, Росії, Молдові, Латвії, Білорусії, Німеччині, Чехії, Угорщині, Данії, Англії, США, Швеції, Франції, Італії, Японії, Китаї [1–10, 16–18, 25, 31–50], визначено, що незначний відсоток конструкцій установок (2 %) передбачає теплоутилізацію відпрацьованої суміші за допомогою теплообмінників-рекуператорів, яка направляє в основному на попередній підігрів свіжої сировини. Максимальне значення виходу біогазу знаходиться в межах 4...6 м³ газу з 1 м³ біореактора за добу, при робочій температурі 40...53 °С, термін зброджування 5...10 діб, реактор вертикального виконання, режим роботи безперервний. У системі БГУ малого та середнього фермерського господарства відсутні елементи попереднього нагріву суміші, утилізації теплоти. В БГУ великої потужності (переважно установки Німеччини, Данії, із них незначний відсоток вітчизняних БГУ) здійснюється просторовий поділ процесу зброджування – працюють одночасно декілька реакторів, що значно збільшує продуктивність.

У [51, 52] запропоноване двостадійне зброджування – в мезофільному і термофільному реакторах. У системі організована рекуперація теплоти відпрацьованого субстрату з термофільного реактора (робоча температура 60 °С): відпрацьований субстрат прокачується через теплообмінник-рекуператор мезофільного реактора (35 °С). Термофільний реактор підігрівається за допомогою виносного теплообмінника.

Отже, аналітичний огляд схемних вирішень БГУ та їх продуктивності по біогазу показав, що від термостабілізації реактора, ефективності теплоутилізації і попередньої підготовки сировини залежить кількість і якість отриманого біогазу. Таким чином, БГУ – це складна система, що призначена для переробки рідких органічних відходів різного походження й отримання теплової та електричної енергії. Щоб синтезувати енергоефективну БГУ, необхідно мати уявлення про процеси, які відбуваються в її елементах, апаратурно-схемне рішення кожного процесу, яке визначає матеріаломісткість, шкідливі скиди та викиди під час експлуатації системи.

У результаті огляду існуючих схем БГУ складено таблицю робочих процесів, що відбуваються в елементах системи: гідродинамічні, механічні, тепломасообмінні, біохімічні [44].

Серед основних елементів можна виділити елементи БГУ, в яких відбуваються тепломасообмінні процеси. Зокрема, це теплогенератор,

біореактор, елементи термостабілізації біореактора, підготовки сировини, теплоутилізації, підготовки біогазу, підготовки технологічної води. Передача теплоти в елементах здійснюється в таких варіантах: вода – вода, субстрат – вода; вода – субстрат, субстрат – субстрат [53–57]. Розглянемо окремо кожний елемент БГУ, тепломасообмінні процеси, що в них відбуваються і найбільш поширені типи теплопередавальних поверхонь для цього елемента БГУ. В теплогенераторі хімічна енергія перетворюється в теплову, яка передається воді або когенераційній системі.

У біореакторі відбуваються втрати теплоти через зовнішню поверхню – передача теплоти субстрат – навколишнє середовище за умов вільної конвекції у великому об'ємі. Для підтримання температурного режиму роботи біореактора встановлюють елементи термостабілізації – вбудовані або виносні теплообмінники різної конструкції і принципу дії. Теплообмінні поверхні, вбудовані в реактор, можуть мати вигляд змійовиків або поодиноких горизонтальних труб, пучків труб, різного виду плоских поверхонь. Поверхні можуть бути гладенькими або шорсткими з виступами і без. Для усунення холодних застійних зон в об'ємі реактора, з використанням таких теплообмінників, застосовують тимчасове механічне або пневматичне переміщення біогазом, в результаті чого відбувається процес інтенсифікації тепловіддачі, вирівнювання поля температур. У цьому випадку теплопередача відбувається за схемою вода – субстрат у разі вільної, вимушеної конвекції з боку субстрату для ламінарних та перехідних режимів руху [58–60].

У разі використання електронагрівальних елементів, вбудованих в реактор, виникає тепловіддача за умови вільної (вимушеної) конвекції біля горизонтальної циліндричної поверхні. У виносних теплообмінниках, які в основному мають конструкцію теплообмінної поверхні типу « труба в трубі », відбувається теплообмін при вимушеній ламінарній або турбулентній течії в круглих трубах, кільцевих каналах однокомпонентних і дисперсних середовищ [59–63].

Стабільність і якість біохімічних і теплообмінних процесів пов'язані між собою. Температура впливає на кількість газу, що можна отримати за визначений проміжок часу, на технологічний час ферментації, а також на склад і якість біогазу та отримуваних добрив. Розрізняють такі рівні характерних температур при яких може виникати

метанове бродіння: криофільний 12...18 °С; психрофільний режим 20...25 °С; мезофільний – 32...35 °С; термотолерантний – 39...42 °С; термофільний – 52...54 °С [3, 6, 32, 49]. При різних температурних рівнях активізуються окремі класи анаеробних бактерій. У випадку переходу з одного рівня температур до іншого, відбувається зміна класу бактерій. У цей період спостерігається зменшення продуктивності установки з біогазу. Для стабільного розвитку і життєдіяльності бактерій, відхилення температури в реакторі БГУ від номінальної повинно не перевищувати 2,8 °С [20, 21]. Нагрівання реактора, завантаженого сировиною, до номінальної температури має проводитись поступово, не більше 2...3 °С за добу [11, 32]. З підвищенням температури бродіння збільшується кількість отриманого біогазу з одиниці об'єму в одиницю часу. Термостабілізація реактора БГУ забезпечується також відповідною теплоізоляцією.

Мікрокалориметричний моніторинг процесу анаеробного бродіння [64] сироватки показав, що при робочій температурі 37 °С на початку утворення біогазу спостерігається додаткове виділення теплоти (в середньому 2,32 Дж/л), що пояснюється ростом метаноутворювальних бактерій в бродильній масі.

Зі значним раптовим збільшенням швидкості руху в біореакторі вихід біогазу знижується на 50 % (досліджувались три типи реактора – біофільтр, реактор із псевдозрідженим шаром, реактор з накопиченням газу і шламу) [65].

Досліджено вплив коливання температури в біореакторі в межах ± 10 °С на процес бродіння гною ВРХ при робочих температурах 50 і 60 °С [66]. Кожної доби поступово знижували температуру протягом 10 годин, підвищували – протягом 5 годин. Спостерігалось, що кількість виробленого біогазу при 60 °С менша, ніж при 50 °С для всіх штучно створених температурних режимів. Встановлено, що зростання температури більш суттєво впливає на зміну виходу біогазу, ніж її зниження. В результаті виявлено можливість використання доступної сонячної енергії для нагріву реактора вдень без додаткового акумулювання теплоти для роботи реактора вночі (робоча температура 50 °С).

В [67] зброджували суміш муніципальних відходів. У випадку раптового примусового зниження температури в реакторі, що стабільно працює з 55 до 20 °С, і раптовому її відновленні за 2 години, виділення біогазу спочатку зупинилося, а при збільшенні – швидко віднови-

лося до попереднього рівня. Якщо раптово знизити температуру і підтримувати її на рівні 20 °С протягом 1, 5, 12, 24 годин, а потім раптово збільшити до 55 °С, то для відновлення виходу біогазу потрібно 3, 11, 56, 72 годин, відповідно. В [67] показано, що раптове збільшення температури на 5 та 10 °С призводить до тимчасового збільшення виходу біогазу, підвищення температури на 10 °С найбільше впливає на продуктивність установки. В [68] розроблено метод кількісного оцінювання впливу нагріву реактора на його розмір, показано як зменшуються розміри реактора за рахунок кращого його прогріву. Запропоновано використовувати реактори меншого розміру.

Елемент підготовки сировини являє собою також теплообмінник-змішувач, де здійснюється попередня підготовка до зброджування, а саме: гомогенізація суміші, нормалізація вологості і попередній підігрів до робочої температури (рекуперативні теплообмінники), або пастеризація (пропарювання) суміші (сумішевий теплообмінник). Теплопередача відбувається від води до субстрату, або від субстрату до субстрату через теплообмінну поверхню, або безпосереднім змішуванням робочих середовищ [55, 63].

В елементах теплоутилізації відпрацьованого субстрату здійснюється передача теплоти субстрат – вода, субстрат – субстрат. В залежності від режиму роботи БГУ, теплообмін відбувається за умов вільної конвекції з боку субстрату і вимушеної конвекції від води, або вимушеної конвекції обох теплоносіїв. Нагрівальними пристроями в елементах підготовки і теплоутилізації є змієвикові, кожухотрубчасті теплообмінники (з шаховим та коридорним розміщенням труб), труба в трубі тощо, які мають плоску поверхню нагріву або циліндричну, з навивкою, виступами. Такі теплообмінники застосовуються разом з системою примусової циркуляції сировини для запобігання відкладень твердих часток на теплообмінній поверхні [55, 59]. В елементах підготовки технологічної води передача теплоти відбувається за схемою вода–вода, газ–вода. У разі вимушеної конвекції течія турбулентна. Для цього можна використати пластинчасті теплообмінники [56, 57]. Огляд робочих процесів показав, що відповідальними елементами БГУ, від роботи яких залежить енергоефективність системи, є теплообмінне обладнання різного виду. Тобто висувуються високі вимоги до якості і стабільності теплообмінних процесів в теплотехнологічному обладнанні БГУ.

1.2 Математичний опис теплообмінних процесів в елементах системи

В основних елементах біогазових установок (БГУ) відбуваються складні тепломасообмінні процеси. Для ефективності БГУ необхідно надійно витримувати сталими такі параметри – температуру суміші в об'ємі реактора, показник рН, концентрацію субстрату, періодичність завантаження субстрату в реактор, збалансованість потоків субстрату зі швидкістю розмноження метанових бактерій тощо. Отже, потрібна надійна, адекватна робочим процесам математична модель, яка повинна включати опис різних за своєю природою об'єктів і явищ.

Розглядаємо біогазову установку (БГУ), яку можна функціонально структурувати таким чином: підготовка органічних відходів до анаеробного зброджування (механічне подрібнення, перемішування, транспортування, підігрів до технологічно заданої температури, завантаження тощо); анаеробне зброджування, яке супроводжується біохімічними процесами без доступу повітря, тепломасообмінними і гідродинамічними процесами; вивантаження, теплоутилізація, розділення твердої і рідкої фази тощо. В цьому дослідженні до уваги береться такий режим роботи БГУ: безперервна робота реактора для анаеробного зброджування; наявні матеріальні і теплові потоки між системою, що розглядається, і зовнішніми системами; завантаження-вивантаження може здійснюватись безперервно і періодично; утилізація теплоти відпрацьованого субстрату: відсутня чи здійснюється в максимально технічно можливих розмірах.

Існуючі системи БГУ мають суттєві недоліки: невеликий питомий вихід біогазу, висока матеріаломісткість, високе техногенне навантаження на навколишнє середовище протягом життєвого циклу системи. Всі ці недоліки – результат спрощеного підходу до синтезу теплотехнологічних систем БГУ, який пояснюється великою складністю задачі. В цьому легко переконатись, проаналізувавши функціональний ланцюг переробки органічних відходів та перелік відходів. Тому є потреба у формулюванні методичних основ синтезу СПОВ.

Методичні основи синтезу включають математичну модель [70, 138], яка, в свою чергу, містить функцію мети (функцію якості). Функція якості є невід'ємною частиною математичного моделювання, яка характеризує енергоефективність СПОВ.

Математичне формулювання задач проектування теплотехнологічних систем можна записати в такому вигляді [70, 138]:

$$\begin{aligned}
 &\text{знайти} && K(X, Y(X), S_j, A) \\
 &\text{при} && B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\
 &&& \Pi_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0; \\
 &&& X_{\min} \geq X \geq X_{\max}; \quad Y_{\min} \geq Y \geq Y_{\max}; \\
 &&& S_j \in S_p; \quad S_p \subset S,
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

де $K(X, Y(X), S_j, A)$ – функція мети; $B_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – система балансових рівнянь; $\Pi_{sj}(X, Y(X), S_j, A) \leq 0$ – 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.

Дотримання сталості температурного режиму БГУ є однією з важливих умов, що забезпечує підвищений вихід біогазу. Досконалість системи термостабілізації БГУ, утилізації теплової енергії та теплообмінного обладнання цієї системи, в значній мірі залежить від правильності математичного опису **тепломасообмінних процесів**, що відбуваються в цих елементах БГУ. Для проектування теплообмінного обладнання БГУ і системи контролю та управління необхідно визначити термічний опір від води до стінки теплообмінника, який достатньо досліджений, та від робочого середовища до стінки, що вивчений недостатньо. Робочим середовищем в БГУ є органічні суміші різного походження. Були спроби описати закономірності теплообміну в багатозначних полікомпонентних середовищах відомими критеріальними рівняннями [82, 83]. Теплофізичні властивості сумішей і закономірності теплообміну в них важко піддаються вивченню і контролю. Тому для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в таких середовищах неможливо використати традиційні методи розрахунку за відомими критеріальними рівняннями. Це все створює відповідні труднощі при математичному моделюванні тепломасообмінних процесів в елементах БГУ.

Для математичного опису теплових процесів запропоновано використовувати експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) [83, 130,

142]. Це принципово новий підхід до використання теорії подібності. В обладнанні СПОВ, з різноманітною конструкцією теплообмінних поверхонь, може застосовуватись велика кількість комбінацій сумішей. Відповідно, для кожного конкретного випадку необхідно застосовувати оригінальні підходи: складати оригінальні математичні моделі, проводити оригінальний базовий експеримент. Отже, побудова математичної моделі відбувається таким чином, що у вихідних даних присутні не тільки числові дані, але й проба (зразок) робочої рідини. В даному випадку при розробці обладнання БГУ використовується поєднання фізичного і математичного моделювання.

Балансові рівняння. Рівняння матеріальних, теплових балансів і рівняння тисків однозначно описують залежності між параметрами в'язів в теплотехнологічній схемі БГУ. Рівняння відомі [70, 141], але потребують адаптації для врахування особливостей режимів роботи БГУ. Для БГУ зв'язки між елементами здійснюються такими енергоносіями (в'язями): водою, повітрям, субстратом, біогазом, відхідними газами, які характеризуються об'ємною (масовою) витратою, температурою, концентрацією, тиском. У процесі складання балансових рівнянь використовується модульний підхід.

Біотехнологічні процеси характеризуються параметром q . Однозначного математичного опису q не існує. Із літературних джерел відомо, що q може змінюватись в межах $0,15 \dots 4$ [2–7, 31–36]. Беручи параметр q у заданому діапазоні, задачу математичного моделювання зводимо до моделювання теплових процесів в елементах БГУ. На даному етапі ми інтегрально оцінюємо q , яке виступає в ролі обмеження

$$0,8 \leq q \leq 2. \quad (1.2)$$

Від значення q залежить об'єм біореактора, матеріаломісткість.

На основі всіх типів рівнянь утворюємо окремі розрахункові модулі БГУ. Модуль складається з універсального набору рівнянь, за допомогою яких можна описати всі можливі (дієздатні) типи елементів БГУ, в рамках заданої системи обмежень.

Систему обмежень можна представити у вигляді рівностей і нерівностей за такими параметрами:

– термодинамічними (температура робочого тіла в реакторі, змішувачі, температура стінки реактора)

$$\begin{aligned}
t_0 + \Delta t &\geq t_{PP} \geq t_0 - \Delta t; \\
t_{PP} + \Delta t &\geq t_{P3} \geq t_{PP} - \Delta t; \\
t_0 + \Delta t &\geq t_{PTOTC} > t_0; \\
W_{PP} &= W_{P3}, \\
t_{CT} &< 60 \text{ } ^\circ\text{C}
\end{aligned}
\tag{1.3}$$

де t_{PP} , t_{P3} , t_{PTOTC} – температура робочого тіла в реакторі, змішувачі та теплообміннику термостабілізації реактора, відповідно, $^\circ\text{C}$; t_0 – оптимальна робоча температура технологічного процесу для відповідного режиму зброджування, $^\circ\text{C}$; Δt – допустиме відхилення температури субстрату від оптимальної, $^\circ\text{C}$; W_{PP} , W_{P3} – вологість робочого тіла в реакторі і в змішувачі, відповідно, %; t_{CT} – температура стінки теплообмінника;

– витратними (кількість завантажуваної суміші за добу, кількість завантажень за добу, витрата води на технологію)

$$V_3 = V_B; \quad V_3 = 0,1 \cdot V_{PP}, \tag{1.4}$$

де V_3 , V_B – об'єм робочого тіла, що завантажується і вивантажується за добу, відповідно, $\text{м}^3/\text{добу}$; V_{PP} – об'єм робочого тіла в реакторі, м^3 ;

– конструктивними (форма і геометричні співвідношення реактора, змішувача, теплоутилізатора), наприклад: для циліндричної форми реактора вертикального виконання $0,8 \leq \varphi_P \leq 1,1$, де φ_P – відношення висоти до діаметра резервуара реактора.

Метою математичного моделювання є знаходження значення термодинамічних, витратних параметрів, склад елементів і вид теплової схеми, сукупності яких відповідає мінімум приведених затрат та максимально можлива енергетична й екологічна ефективність роботи БГУ.

Нами запропоновано за функцію якості СПОВ брати техногенне навантаження T_H або зменшення техногенного навантаження ΔT_H на навколишнє середовище протягом життєвого циклу LC, яке визначає ступінь впливу техногенних факторів на довкілля (шкідливі викиди, скиди)

$$T_H(K_1 \cup K_2 \cup K_3); \quad \Delta T_H(\Delta K_1 \cup \Delta K_2 \cup \Delta K_3), \tag{1.5}$$

де K_1 – вплив на людське здоров'я; K_2 – вплив на якість екосистеми; K_3 – вичерпання запасів мінералів і викопних палив.

Також функцією якості можуть бути [139–141]: відносна частка біогазу на власні потреби ψ^* ; показники інтенсивності процесу анаеробної переробки відходів в СПОВ q^* та q :

$$\psi^* = \frac{q_{\text{ВП}}^*}{q^*}, \quad (1.6)$$

де $q_{\text{ВП}}^*$ – питома кількість біогазу, що витрачається на власні потреби БГУ, $\text{нм}^3/(\text{добу} \cdot \text{кг})$; q^* – питомий вихід біогазу на одиницю маси матеріалів БГУ (інтенсивність процесу метанового бродіння, що характеризується кількістю отриманого продукту на одиницю маси матеріалів установки в одиницю часу), $\text{нм}^3/(\text{добу} \cdot \text{кг})$

$$q^* = \sum_{\tau=1}^T \frac{\sum_{r=1}^R (V_p \cdot q)_{\tau r}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\lambda \cdot M)_{\tau kji}}, \quad (1.7)$$

де T, τ – повний термін експлуатації установки, років; R, r – кількість розрахункових режимних періодів у даному τ -му році; K, k – кількість елементів в БГУ; J, j – кількість конструктивних частин k -го елемента; I, i – кількість типів матеріалів j -ї конструктивної частини k -го елемента; $M_{\tau kji}$ – маса i -го матеріалу j -ї конструктивної частини k -го елемента, кг; λ – коефіцієнт витрати i -го матеріалу, що враховує втрати в процесі виготовлення, монтажу, транспортування j -ої конструктивної частини k -го елемента; q – питомий вихід біогазу з одиниці об'єму реактора БГУ за добу, $\text{нм}^3/(\text{добу} \cdot \text{м}^3)$

$$q = \sum_{\tau=1}^T \frac{\sum_{r=1}^R V_{\delta_{\tau r}}}{(V_p)_{\tau}}, \quad (1.8)$$

де V_p – об'єм реактора, м^3 ; $V_{\delta_{\tau r}}$ – вихід біогазу з 1 м^3 реактора за добу під час r -го періоду в даному τ -му році, $\text{м}^3/\text{добу}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : монографія / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2004. – 132 с.
2. Куріс Ю. В. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти : монографія / Ю. В. Куріс, І. Ф. Червоний. – Запоріжжя : ЗДІА, 2010. – 488 с.
3. Волова Т. Г. Биотехнология / Т. Г. Волова. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. – 252 с.
4. Світові тенденції розвитку біогазових установок // Пропозиція. – 2001. – № 12. – Режим доступу до журн. : <http://www.propozitsiya.com>.
5. Мосин О. В. Экологические аспекты современной биотехнологии / О. В. Мосин. – Режим доступу : <http://www.allbest.ru>.
6. Семенов І. В. Проектирование биогазовых установок / І. В. Семенов. – Сумы : МакДен, 1996. – 347 с.
7. Анаэробная переработка стоков ферм на биогазовых установках / Н. П. Ледин, В. Н. Синчурин, С. И. Кононенко, И. Н. Ледин. – Режим доступу : http://agrooug.ru/page/list_item/_id-2361.
8. Ткаченко С. Й. Аналіз факторів зниження матеріаломісткості та підвищення енергоефективності біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 47–53.
9. № 30928 Україна, МКИ С02F 11/04. Спосіб анаеробного зброджування органічних відходів та установка для його здійснення / І. В. Семенов, М. Г. Зінченко, Д. Н. Дрожина. – № 98063214; заявлено 15.12.2000 ; опубл. 15.07.01, Бюл. № 7.
10. Патент України № 51209А, МКИ С02F11/04. Біогазова установка / Г. Є. Мовсесов. – № 2002010796 ; заявл. 31.01.02 ; опубл. 15.11.02, Бюл. № 11.
11. Жирков В. Основы строительства биогазовой установки для анаэробной переработки сельскохозяйственных отходов / В. Жирков, А. Герман, Ю. Матвеев. – Режим доступу : <http://www.mastercity.ru/attachment.php?attachmentid=104921>.
12. Родина Е.М. Использование эмиссий метана из отходов для получения биогаза / Е. М. Родина, Ш. А. Ильясов, З. А. Абайханова // Вестник КРСУ. – 2003. – № 6. – Режим доступу : <http://www.krsu.edu.kg/vestnik/2003/v6/a04.html>.
13. Некрасов В. Г. Оценка экономической эффективности метанового сбраживания навоза / В. Г. Некрасов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 6. – С. 27–29.

14. Михайлив Н. И. Основные принципы технико-экономической и экологической оценки нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / Н. И. Михайлив // Нові технології та інвестиції США в енергетичний сектор України : III міжнародна конференція «EnerCon - 97» 1997 р. : тези доповідей. – К., 1997. – С. 78.
15. Кива А. А. Биоэнергетическая оценка и снижение энергоёмкости технологических процессов в животноводстве / А. А. Кива, В. М. Рабштына, В. И. Сотников. – М. : Агропромиздат, 1990. – 176 с.
16. Веденев А. Г. Биогазовые технологии в Кыргызской республике / А. Г. Веденев, Т. А. Веденева ; ОФ «Флюид». – Бишкек : ЕВРО, 2006. – 90 с.
17. Грицаєнко В. І. Енергозберігаючі технології у молочному скотарстві / В. І. Грицаєнко, М. І. Машкин. – К. : Урожай, 1992. – 182 с.
18. Кацинський Б. Б. Біоенергетичний комплекс для виробництва високоякісних добрив, електроенергії і тепла / Б. Б. Кацинський, Т. К. Крушневич // Ринок інсталяційний. – 1997. – № 9. – С. 10–11.
19. Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Є. П. Ларюшкін, Г. О. Нудель, В. С. Таргоня // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 1998. – № 2. – С. 48–55.
20. Гелетуха Г. Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы / Г. Г. Гелетуха, С. Г. Кобзар // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 4. – С. 3–11.
21. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная, Н. М. Жовмир, Ю. Б. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 1. – С. 78–85.
22. Дубровін В. О. Перспективи створення біогазових установок в Україні / В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, М. Д. Мельничук // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні : збірник наукових статей. – Львів : ЛьВЦНТЕІ. – 2005. – С. 167–171.
23. Відходи тваринницьких підприємств / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, А. А. Моргунов // Бізнес і екологія : матеріали I Всеукр. наук.-практ. конф. – Донецьк, 2001. – С. 34.
24. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2011. – 132 с.
25. Мельников С. В. Гидравлический транспорт в животноводстве / С. В. Мельников, В. В. Калюга, Ю. К. Сазонов. – М. : Россельхозиздат, 1976. – 190 с.
26. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения / [пер.с нем. П. Я. Семенова]. – М. : Колос. 1978. – 271 с.

27. Буряк Ю. Н. Системы удаления и хранения бесподстилочного навоза / Ю. Н. Буряк, В. Г. Рязанцев. – М. : Росагропромиздат, 1986. – 48 с.
28. Голченко М. Г. Орошение сточными водами / М. Г. Голченко, В. И. Железяко. – М. : Агропромиздат, 1988. – 104 с.
29. Андреев В. А. Использование навоза свиней на удобрения / В. А. Андреев, М. Н. Новиков, С. М. Лукин. – М. : Росагропромиздат, 1990. – 94 с.
30. Смирнов О. П. Сооружения по подготовке к использованию отходов животноводства / О. П. Смирнов [и др.]. – К. : Урожай, 1989. – 152 с.
31. Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / Бурга Геммеке, Криста Ригер, Петер Вайланд, Йенс Шредер ; Специальное агентство возобновляемых ресурсов Хофплатц, Германия ; Институт аграрных технологий и биосистемной техники Бундесаллее. – Брауншвайг : Германия, 2010. – 188 с.
32. Баадер Б. Биогаз : Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер. – М. : Колос, 1982. – 148 с.
33. Веденев А. Г. Строительство биогазовых установок : краткое руководство / А. Г. Веденев, А. Н. Маслов. – Бишкек : Евро, 2006. – 28 с.
34. Хабибуллин С. С. Биоэнергетическая конверсия органических отходов / С. С. Хабибуллин // Социально-экономические и технические системы. – 2008. – № 4. – Режим доступа: <http://sets.ru/base/47nomer/habibul/1.pdf>
35. Панцхава Е. С. Биоэнергетические установки по конверсии органических отходов в топливо и органические удобрения / Е. С. Панцхава, Н. Л. Кошкин // Теплоэнергетика. – 1993. – № 4. – С. 20–23.
36. Дубровский В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В. С. Дубровский, У. С. Виестур. – Рига : Зинатне, 1988. – 204 с.
37. Pich I. R. Production of methane from combination of wheat and straw and swine manure / I. R. Pich, E. L. Janotti // Trans ASDE. – 1982. – V. 26, № 2. – P. 546–548.
38. Sasse J. Engineering aspects of smallscale biogas plants / J. Sasse // Biogas Technology, Transfer and Diffusion. – 1986. – P. 213–227.
39. Малогабаритні біогазові установки // Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. – 1999. – № 2. – С. 83.
40. Ясинецкий В. А. Оборудование для получения биогаза из навоза / В. А. Ясинецкий, В. С. Таргоня // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – № 44. – С. 23–24.

41. Зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище в підсистемах енергозабезпечення систем біоконверсії : звіт про НДР 82-Д-276 (заключний) / Вінницький національний технічний університет. – № ДР 0105U002425; Інв. № 0211U001040. – Вінниця, 2009. – 160 с.
42. Новітні технології біоенергоконверсії : монографія / Я. Б. Блюм, Г. Г. Гелетуха, І. П. Григорюк [та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.
43. Зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище енергозберігаючих систем утилізації органічних відходів : звіт про НДР 82-Д-312 (заключний) / Вінницький національний технічний університет. – № ДР 0108U000667; Інв. № 0211U001040. – Вінниця, 2010. – 150 с.
44. Якушко С. И. Выбор технологических режимов в установках для производства биогаза / С. И. Якушко // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – № 5(89). – С. 102–108.
45. Пузанков А. Г. Обеззараживание стоков животноводческих комплексов / А. Г. Пузанков, Г. А. Мхитарян, И. Д. Гришаев. – М. : Агропромиздат, 1986. – 175 с.
46. Толстых С.В. Применение биогазовых технологий при утилизации органических отходов / С. В. Толстых, А. А. Васливанов // Научно технический сборник. – 2007. – № 74. – Режим доступа : <http://www.eprints.ksame.kharkov.ua>.
47. Бурдейный Д. Н. Получение энергии и удобрений из биомассы/ Д. Н. Бурдейный, В. И. Шаталов, Ю. И. Свитличная // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 2. – С. 77–80.
48. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.
49. Патент України на винахід № 11139, (51) МПК (2006.01) C12M 1/107. Установа для метанового зброджування біомаси / І. В. Семененко, М. Г. Зінченко, Д. Н. Дрожина, С. І. Якушко, Є. В. Чмеленко, Н. П. Карпенко ; заявник і патентовласник Харківський державний політехнічний університет. – № 94321703 ; заявл. 31.03.1993 р.; опубл. 25.12.1996, Бюл. № 4.
50. Schafer P. L. Turning up the heat / P. L. Schafer, J. B Farrell // WE & T. – 2000. – P. 27–32.
51. Oles, J. Full scale experience of two stage thermophilic / mesophilic sludge digestion / J. Oles, N. Dichtl, H.-H. Niehoff // Wat. Sci. Tech. – 1997. – V. 36, № 6–7. – P. 449–456.
52. Патент України на корисну модель № 15905, (51) МПК (2006.01) C02F11/04. Установа для отримання біогазу / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Пішеніна Н. В., Гуменюк М. С. ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200601131 ; заявл. 06.02.06 ; опубл. 17.07.06, Бюл. №7.

53. Патент України на корисну модель № 41855, (51) МПК (2006.01) C02F11/00, C02F11/04. Установка для отримання біогазу / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Пішеніна Н. В. ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200900428; заявл. 23.01.09 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.
54. Ткаченко С. Й. Методи та засоби термостабілізації біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Д. В. Степанов // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні : матеріали третьої міжнар. наук.-практ. конф. – Львів : ЛВЦНТЕІ, 2005. – С. 167–171.
55. Каневец Г. Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г. Е. Каневец. – К. : Техніка, 1979. – 352 с.
56. Каневец Г. Е. Оптимизация теплообменного оборудования пищевых производств / Г. Е. Каневец, И. И. Сагань, Н. И. Иванова. – К. : Техніка, 1981. – 192 с.
57. Анцюнас А. Биогаз на ферме / А. Анцюнас, Р. Янушаускас // Моделист-конструктор. – 2001. – № 1. – С. 12–17.
58. Коновалов С. В. Відновлювана енергетика та енергозберігаючі технології / С. В. Коновалов, С. Й. Ткаченко // Екоенергетик. – 2003. – С. 125.
59. Драганов Б. Х. Анализ параметров теплообменных процессов в реакторе биогазовой установки / Б. Х. Драганов // Відновлювана енергетика. – 2007. – № 1. – С. 79–81.
60. Биомасса как источник энергии : // под ред. С. Соуера]. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
61. Патент України на корисну модель № 19219, (51) МПК (2006) F26B9/00. Установка для використання та утилізації енергії біогазу / Співак О. Ю., Резидент Н. В., Колесник Н. В. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № 200605262 ; заявл. 15.05.06 ; опубл. 15.12.06, Бюл. №12.
- 62 Ткаченко С. Й. Енергоефективні схеми біогазових установок з утилізацією теплоти / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, І. В. Буженко // Энергосбережение. – 2009. – № 2. – С. 11–13.
63. An investigation and microcalorimetric monitoring of anaerobic treatment of concentrated waste in the cheese industry / V. Blonskaja, A. Menert, E. Rikmann [та ін.] // European Water Management. – 2001. – V. 4, № 1. – P. 59–64.
64. Joo-Hwa. Tay Stability of High-Rate Anaerobic Systems. I: Performance under Shocks / Joo-Hwa Tay, Xiyue Zhang // Journal of Environmental Engineering. – 2000. – V. 126, № 8. – P. 713–725.
65. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure / H. M. El-Mashad, G. Zeeman, W. K. P. van Loon [та ін.] // Bioresource Technology. – 2004. – № 95. – P. 191–201.

66. Man-Chang Wu. Influence of temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of municipal organic solid waste / Man-Chang Wu, Ke-Wei Sun, Yong Zhang // Journal of Zhejiang University. Science. – 2006. – № 7(3). – P. 180–185.

67. Effects of temperature and temperature shock on the performance and microbial community structure of a submerged anaerobic membrane bioreactor / W. J. Gao, K. T. Leung, W. S. Qin, B. Q. Liao // Bioresource Technology. – 2011. – V. 102, № 19. – P. 8733–8740.

68. Paquin D. Estimating the Spatial Variation of Anaerobic Digester Heating Potential / D. Paquin, T. Liang // Biosystems Engineering. – 2006. – V. 95, № 2. – P. 227–233.

69. Кафаров В. В. Анализ и синтез химико-технологических систем : учебник для вузов / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1991. – 432 с.

70. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1978. – 416 с.

71. Аналіз і систематизація інформації техногенних по органічних відходах, можливостях отримання з них енергоносіїв, апаратурно-схемному забезпеченню систем та методів оцінки техногенних ризиків : звіт про НДР 82-Д-334 (проміжний) / Вінницький національний технічний університет. – № ДР 0111U001106 ; Інв. № 0211U001040. – Вінниця, 2011. – 145 с.

72. Степанов Д. В. Методи оцінки екологічної ефективності водогрійних котлів малої потужності з врахуванням життєвого циклу / Степанов Д. В., Ткаченко С. Й., Боднар Л. А. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 6. – С. 80–84.

73. Степанов Д. В. Критерії оцінки ефективності жаротрубного пучка з інтенсифікацією теплообміну для котла малої потужності / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – № 4. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4/2008-4.files/uk/08dvswlc-uk.pdf>.

74. Боднар Л. А. Застосування методології оцінки впливу життєвого циклу виробу до котла малої потужності / Л. А. Боднар, Д. В. Степанов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 1. – С. 118–121.

75. Environmental Benefits of Livestock Manure Management Practices and Technology by Life Cycle Assessment / D. L. Sandars, E. Audsley, C. Cañete [та ін.] // Biosystems Engineering. – 2003. – V. 84. № 3. – P. 267–281.

76. Елюхина И. В. Об интерпретации реологических свойств водных растворов глицерина в экспериментах с капиллярным вискозиметром / В. И. Елюхина, В. М. Хисамов, В. П. Бескачко // V Всероссийс-

кая конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям с участием иностранных ученых, 2004 : материалы конференции. – Режим доступа : <http://www.ict.nsc.ru/ws/УМ2004/8609/yelyukhina2.html>.

77. Письменов В. Н. Получение и использование бесподстилочного навоза / В. Н. Письменов. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 206 с.

78. Сурнин В. И. Использование жидкого навоза / В. И. Сурнин. – М. : Россельхозиздат, 1978. – 64 с.

79. Технология орошения животноводческими стоками / А. М. Буцыкин, В. Г. Луцкий, А. Г. Пономарев, Л. П. Рева. – М. : Агропромиздат, 1987. – 160 с.

80. Погорелый Л. В. Биотехнические системы в животноводстве / Л. В. Погорелый. – К. : Урожай, 1992. – 344 с.

81. Ткаченко С. Й. Дослідження теплообміну до багатоконпонентних органічних сумішей в умовах вільної конвекції біля вертикальної циліндричної стінки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2006. – № 4. – С. 37–41.

82. Ткаченко С. Й. Тепловіддача до багатоконпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2006. — № 1. — С. 111—114.

83. Ткаченко С. Й. Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Електронний журнал Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2009. – № 2. – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-2/2009-2.files/uk/09sjtobs_ua.pdf.

84. Тропин А. Н. Повышение эффективности работы самотечной системы удаления навоза путем оптимизации ее конструктивных и технологических параметров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Тропин Александр Николаевич ; Государственное научное учреждение Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук. – СПб, 2011. – 24 с.

85. Кузин В. А. Выбор элементов поточной технологической линии удаления навоза для фермерских хозяйств / В. А. Кузин, А. Н. Ковальчук // Проблемы современной аграрной науки : материалы международной заочной научной конференции / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации / Красноярский государственный аграрный университет. – 2011. – С. 116–120.

86. Васильев В. А. Справочник по органическим удобрениям / А. В. Васильев, Н. В. Филиппова. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 255 с.

87. Разработка, внедрение и исследование промышленной выпарной установки для упаривания мыльно-щелочного раствора : отчет о НИР (заключительный) / Винницкий политехнический институт. – 06.АВГ81 ; № ГР 79048086 ; Инв. № Б971919. – Винница, 1980. – 228 с.

88. Изменение реологических свойств соапстоков в зависимости от перерабатываемого сырья / В. Г. Мормитко, В. З. Глоба, Б. А. Дехтерман [и др.] // Известия вузов. Пищевая технология. – 1983. – № 4. – С. 85–88.

89. Rheological properties of dairy cattle manure / Hamed M. El-Mashad, Wilko K.P. van Loon, Grietje Zeeman, Gerard P.A. Bot // *Bioresource Technology*. – 2005. – V. 96, № 5. – P. 531–535.

90. Abdellatif A. B. Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure / Abdellatif Achkari-Begdouri, Philip R. // *Goodrich Bioresource Technology*. – 1992. – V. 40, № 2. – P. 149–156.

91. Marcotte M. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature / M. Marcotte, A.R. Taherian Hoshahili, H. S. Ramaswamy // *Food Research International*. – 2001. – № 34. – P. 695–703.

92. Abdellatif A. B. Bulk density and thermal properties of Moroccan dairy cattle manure / Abdellatif Achkari-Begdouri, Philip R. // *Goodrich Bioresource Technology*. – 1992. – V. 40, № 3. – P. 225–233.

93. Chen Y.R. Thermal properties of beef cattle manure / Y. R. Chen // *Agricultural Wastes*. – 1983. – № 6. – С. 13–29.

94. Chen Y. R. Rheological properties of sieved beef-cattle manure slurry: rheological model and effects of temperature and solids concentration / Y. R. Chen // *Agricultural Wastes*. – 1986. – № 15. – С. 17–33.

95. Chen Y. R. Rheological properties of aerated poultry waste slurries / Y. R. Chen, A. G. Hashimoto, // *Transactions of the ASAE*. – 1976. – № 19(1). – P. 128–133.

96. Kaya A. Rheology of solid Gaziantep Pekmes / A. Kaya, K. B. Belibagli // *Journal of Food Engineering*. – 2002. – № 54. – P. 221–226.

97. Kumar M. Flow properties of animal slurries / M. Kumar, H. D. Bartlett, N. N. Mohsenin // *Transactions of the ASAE*. – 1972. – № 15(4). – P. 718–722.

98. Daniel J. O'Neil. Rheology and mass/heat transfer aspects of anaerobic reactor design / Daniel J. O'Neil // *Biomass*. – 1985. – V. 8, № 3. – P. 205–216.

99. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен / У. Л. Уилкинсон ; перевод с английского З. П. Шульмана под ред. А. Л. Лыкова. – М. : Мир, 1964. – 216 с.

100. Овчинников П. Ф. Реология тиксотропных систем / П. Ф. Овчинников, Н. Н. Круглицкий, Н. В. Михайлов. – К. : Наукова думка. – 1972. – 120 с.
101. Пивинский Ю. Е. Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем / Ю. Е. Пивинский. – СПб : РИО СПбГТИ(ТУ) – 2001. – 174 с.
102. Косой В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. – СПб : Гиорд, 2005. – 648 с.
103. Мачихин Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / А. Ю. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 214 с.
104. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.
105. Яхно О. М. Гідравліка неньютонівських рідин: навч. посібник. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. – К. : Вища школа, 1995. – 199 с.
106. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей / Л. П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1970. – 236 с.
107. Пономарев С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений [Кн. 1]: монография. в 2 кн. / С. В Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. — 204 с.
108. Пономарев С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография в 2 кн. Кн. 2. С. В Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 204 с.
109. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Иженерные методы расчета / С. Бретшнайдер ; под ред. П. Г. Романкова. – Л. : Химия, 1966. – 536 с.
110. Цедерберг Н. В. Теплопроводность газов и жидкостей / Н. В. Цедерберг. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
111. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм ; пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под ред. В. Г. Куличихина. – М. : Колос, 2003. – 213 с.
112. Пузанков А. Г. Обеззараживание стоков животноводческих комплексов / А. Г. Пузанков, Г. А. Мхитарян, И. Д. Гришаев. – М. : Агропромиздат, 1986. – 175 с.
113. Дульнев Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
114. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар ; пер. с франц. М. Г. Беды, А. Н. Вишнякова, Ю. Б. Воронова. – М. : Мир, 1968. – 464 с.

115. Юсупов Ш. Т. Теплофизические и термодинамические свойства растительных масел и некоторых их растворов в широком интервале температур и давлений : автореф. дис. ... докт. техн. наук. : 01.04.14 / Юсупов Шабони Тагоевич ; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. – Казань, 2012. – 38 с.

116. Викторов М. М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты / М. М. Викторов – Л. : Химия. – 1977. – 360 с.

117. Василенко С. М. Межфазное взаимодействие в двухфазных кольцевых потоках в теплообменных аппаратах пищевой промышленности / С. М. Василенко // Известия вузов. Пищевая технология. – 1999. – № 4. – С. 74–76.

118. Теплоотдача к двухфазным потокам при низких давлениях и массовых скоростях / Н. А. Прядко, В. П. Петренко, Н. Ю. Тобилевич, Я. И. Засядько // Химическая технология. – 1985. – № 6. – С. 34 – 37.

119. Безродный М. К. Гидродинамика и контактный тепломассообмен в некоторых газожидкостных системах : монография / М. К. Безродный, П. А. Барабаш, Н. Н. Голянд. – К. : НТУУ «КПИ», 2011. – 408 с.

120. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З. Р. Горбис. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.

121. Шульман З. П. Конвективный тепломассоперенос реологически сложных жидкостей / З. П. Шульман. – М. : Энергия, 1975. – 350 с.

122. Справочник по теплообменникам : в 2-х т. Т. 1 / пер. с англ под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

123. Химическая гидродинамика : справочное пособие / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запryanов [и др.]. – М. : Квантум, 1996 – 336 с.

124. Кузьмин Сергей Иванович. Теплообмен и трение в реологических системах с учетом переменной вязкости жидкости : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Сергей Иванович Кузьмин ; Астраханский государственный технический университет. – Астрахань, 2005. – 160 с.

125. Некоторые вопросы гидродинамики и теплообмена структурно-вязких сред / С. С. Кутателадзе, Е. М. Хабахпашева, В. Б. Лемберский, В. И. Попов // Тепло- и массообмен в неньютоновских жидкостях / под общ. ред. А. В. Лыкова, Б. М. Смольского ; Институт тепло- и массообмена АН БССР. – М. : Энергия, 1968. – С. 69–90.

126. Бердыев О. Экспериментальное исследование теплообмена в установках по выработке биогаза: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Бердыев Овезмурад ; Научно-производственное объединение «Солнце». – Ашхабад, 1989. – 24 с.

127. Chen Y. R. Heat Transfer in Laminar Tube Flow of Beef Cattle Manure Slurries / Y. R. Chen // Transactions of the ASAE. – 1988. – V. 31(3). – P. 892–897.

128. Богданов П. В. Система подогрева жидкого свиного навоза в технологиях анаэробного сбраживания : автореф. дис. // техн. наук : 05.20.01 / Богданов Павел Викторович ; Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – М., 1990. – 18 с.

129. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2011. – 132 с.

130 Патент України на корисну модель № 24616, (51) МПК (2006.01) G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент ; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № 200701190 ; заявл. 05.02.07 ; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

131. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – 3-е изд. доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

132. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – 5-е изд. доп. – М. : Атомиздат, 1979. – 416 с.

133. Гребер Г. Основы учения о теплообмене / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль ; под ред. А. А. Гухмана. – М. : Издательство иностранной литературы, 1958. – 566 с.

134. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1949. – 396 с.

135. Кутателадзе С. С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.

136. Кулінченко В. Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу) : навч. підручник / В. Р. Кулінченко, С. Й. Ткаченко. – Режим доступу <http://posibnyky.vntu.edu.ua/tep/index.htm>.

137. Эккерт Э. Р. Теория тепло- и масообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк ; под. ред. А. В. Лыкова. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.

138. 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. – Винница, 1987. – 440 с.

139. Синтез природо- і енергозбережних систем вироблення енергоносіїв із органічних відходів / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Н. В. Пішеніна [та ін.] // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – № 7. – С. 123–130.

140. Ткаченко С. Й. Наземні біогазові установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2010. – № 2. – С. 147–152.
141. Ткаченко С. Й. Математичне моделювання робочих процесів в біогазовій установці / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 41–47.
142. Ткаченко С. Й. Удосконалення експериментально-розрахункового методу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : наук. зб. – Дніпропетровськ, 2010. – № 2. – С. 171–183.
143. Програмне забезпечення SimaPro7. – Режим доступу: http://www.pre.nl/simapro/download_simapro.htm.
144. Heat transfer model for Plug-Flow Anaerobic Digesters. – Режим доступу: <http://vivo.cornell.edu/display/individual16612>
145. Biogas Production from Animal Manure. – Режим доступу: <http://vivo.cornell.edu/display/individual30916>
146. Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2011. – № 2. – С. 124–131.
147. Акельев В. Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений : монография / В. Д. Акельев ; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск : БНТУ, 2010. – 317 с.
148. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі // С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 103–110.
149. Ткаченко С. Й. Метод визначення інтенсивності теплообміну в реонестабільних сумішах / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2012. – № 2. – С. 78–87.
150. Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам / В. Р. Кулинченко. – К. : Техніка. – 1988. – 256 с.
151. Холланд Ф. Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов / Ф. Холланд, Ф. Чапман ; пер. с англ. под ред. Ю. М. Жорова. – М. : Химия, 1974. – 208 с.
152. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы / В. Д. Попов. – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 320 с.
153. Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / С. Й. Ткаченко,

Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент ; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № а201005661 ; заявл. 11.05.10 ; опубл. 26.05.11, Бюл. № 2.

154. Рахманкулов Д. Л. Физические и химические свойства глицерина / Д. Л. Рахманкулов, Б. Х. Кисманов, Р. Р. Чанышев. – М. : Химия, 2003. – 199 с.

155. Ткаченко С. Й. Термічна і біотехнологічна нестабільність в реакторі анаеробної переробки відходів / С. Й. Ткаченко, В. І. Риндюк, Н. В. Пішеніна, С. В. Риндюк, С. В. Дишлюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – № 7. – С. 131–137.

156. Патент України на корисну модель № 46807, (51) МПК (2009) C02F11/04. Установа для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. Д. Степанова, Н. В. Пішеніна ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № u200906401 ; заявл. 19.06.09 ; опубл. 11.01.10, Бюл. № 1.

157. Пішеніна Н. В. Енергозабезпечення теплотехнологічної системи вироблення біопалива / Н. В. Пішеніна, С. В. Дишлюк, С. В. Пелішенко // Сучасні екологічно безпечні та енергозберігаючі технології в природокористуванні : матеріали Міжнар. наук.-практ. конфер. молодих вчених і студентів : 26–28 квітня 2011 р., м. Київ, 2011. – Ч. 1. – С. 121–124.

158. Пішеніна Н. В. Проблеми тепломасообміну в процесі виробництва відновлювального пального / Н. В. Пішеніна, С. В. Дишлюк., С. В. Пелішенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С.90–93.

159. Степанов Д. В. Утилізація теплоти в схемі системи переробки органічних відходів / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар, Н. В. Пішеніна // Енергетика та електрифікація. – 2011. – № 4. – С. 68–71.

160. Патент України на корисну модель № 41855, (51) МПК (2009) C02F 11/00, C02F 11/04 (2006.01). Установа для отримання біогазу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент, Н. В. Пішеніна ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № u200900482 ; заявл. 23.01.09 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.

161. Пішеніна Н. В. Диверсифікація енергоносіїв в енерготехнологічній схемі спиртового заводу / Н. В. Пішеніна // Еколого-енергетичні проблеми сучасності : тези доп. XI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів. – Одеса, 2011. – С. 141–143.