

С. Й. Ткаченко, д-р техн. наук, проф.;
Н. В. Пішеніна, асп.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

Створено методичні основи математичного моделювання теплотехнологічних схем біогазових установок з урахуванням особливостей біогазових технологій. Результати моделювання апробовані на перспективній схемі біогазової установки з утилізацією теплоти.

Вступ та постановка задачі

Вироблення із органічних відходів енергоносіїв доцільне як з енергетичних, так і екологічних позицій. Біогазові технології сьогодні поширені у світі. Можна синтезувати сотні і тисячі варіантів теплотехнологічних схем БГУ [1], які відрізняються складом обладнання, топологією, режимами роботи.

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, швидкість подачі 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.

Розглянемо біогазову установку (БГУ), яку можна функціонально структурувати таким чином: підготовка органічних відходів до анаеробного зброджування (механічне подрібнення, переміщення, 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 фаз тощо. В цьому дослідженні до уваги приймається 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, здійснюється в максимально технічно можливих розмірах.

Математичне формулювання задач проектування теплотехнологічних систем можна записати в такому вигляді [2, 3]:

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

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

Ефективність роботи БГУ характеризується критеріями якості. Критеріями якості можуть бути термoeкономічний, ексергетичний критерії, зведені затрати, термін окупності тощо. В [4] запропоновано безрозмірний термoeкономічний критерій, який є відношенням сумарної ексергетичної вартості всіх видів продукції і ефектів за певний час до всіх видів витрат в ексергетичних одиницях:

$$E^* = WQ_p^H (I - \psi) / \left[\sum E_i / \eta_{ie} + \sum_i \sum_j E_{ij} / \eta_{ij} + E_Y \right], \quad (2)$$

де W — добова продуктивність БГУ біогазу, м³/добу; Q_p^H — нижня робоча теплотворна спроможність біогазу, Дж/м³; ψ — частка біогазу, яка використовується для підтримання температурного режиму БГУ; E_i — ексергія, яку потрібно взяти у джерела енергії, а потім підвести до БГУ i -м ланцюгом; η_{ie} — коефіцієнт, за яким визначається витрата ексергії на її отримання одиниці ексергії, котра відбирається у будь-якого джерела для потреб технології; η_{ij} — відношення ексергетичної вартості j -го елемента в i -му ланцюзі схеми до витрат ексергії на отримання вказаної вище ексергії; E_Y — ексергетична вартість утилізації установки, яка віднесена до однієї доби експлуатації БГУ, кДж/доба.

В [3] за критерій якості приймаються зведені затрати

$$Z = \sum_{\tau=1}^T \frac{B_\tau + EK_\tau}{(1 + E_n)^{T-\tau}}, \quad (3)$$

де B_τ і K_τ — експлуатаційні витрати та капіталовкладення за τ -й рік періоду T ; E — нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень; E_n — нормативний коефіцієнт зведення різних затрат за період часу $\tau - T$.

Метою математичного моделювання є знаходження значення термодинамічних, витратних параметрів, складу елементів і виду теплової схеми, сукупності яких відповідає мінімум зведених затрат та максимально можлива енергетична і екологічна ефективності роботи БГУ. Авторами запропоновано функцію для відображення мети математичного моделювання БГУ:

$$\psi^* = \frac{q_{\text{ВП}}^*}{q^*}, \quad (4)$$

де ψ^* — відносна частка біогазу на власні потреби; $q_{\text{ВП}}^*$ — питома кількість біогазу, що витрачається на власні потреби БГУ, нм³/(добу·кг); q^* — питомий вихід біогазу на одиницю матеріалу БГУ (інтенсивність процесу метанового бродіння, що характеризується кількістю отриманого продукту на одиницю маси матеріалів установки в одиницю часу), нм³/(добу·кг):

$$q^* = \sum_{\tau=1}^T \frac{\sum_{r=1}^R (V_p q)_{\tau r}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\lambda M)_{\tau k j i}}; \quad (5)$$

де T, τ — повний термін експлуатації установки, років; R, r — кількість розрахункових режимних періодів в 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; $M_{\tau k j i}$ — маса i -го матеріалу j -ї конструктивної частини k -го елемента в τ -му році, кг; λ — коефіцієнт витрати i -го матеріалу, що враховує втрати під час виготовлення, монтажу, транспортування j -ї конструктивної частини k -го елемента; q — питомий вихід біогазу з одиниці об'єму реактора БГУ за добу, нм³/(добу·м³):

$$q = \sum_{\tau=1}^T \frac{\sum_{r=1}^R V_{\delta_{\tau r}}}{(V_p)_{\tau}}, \quad (6)$$

де V_p — об'єм реактора, м³; $V_{\delta_{\tau r}}$ — вихід біогазу з 1 м³ реактора за добу під час r -го періоду в τ -му році, м³/добу.

Рівняння матеріальних, теплових балансів і рівняння тисків однозначно описують залежності між параметрами в'язів у теплотехнологічній схемі БГУ. Рівняння відомі [3], але потребують ада-

птації 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.

Біотехнологічні процеси характеризуються параметром q . Однозначного математичного опису q не існує. Із літературних джерел відомо, що q може змінюватись в межах $0,15 \dots 4$ [5, 6]. Приймаючи параметр q в заданому діапазоні, задачу математичного моделювання зводимо до моделювання теплових процесів в елементах БГУ. На цьому етапі ми інтегрально оцінюємо q , яке виступає в якості обмеження

$$0,8 \leq q \leq 2. \quad (7)$$

Дотримання сталості температурного режиму БГУ є однією із важливих умов, що забезпечує підвищений вихід біогазу. Досконалість системи термостабілізації БГУ, утилізації теплової енергії та теплообмінного обладнання цієї системи в значній мірі залежать від правильності математичного опису тепломасообмінних процесів, що відбуваються в цих елементах БГУ. Для проектування теплообмінного обладнання БГУ та системи контролю і 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. Закономірності теплообміну в багатофазних полікомпонентних середовищах описуються відомими критеріальними рівняннями [7, 8]. 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 у ході математичного моделювання тепломасообмінних процесів в елементах БГУ. Для математичного опису теплових процесів запропоновано використовувати експериментально-розрахунковий метод (ЕРМ) [8—10]. Алгоритм ЕРМ дозволяє визначити інтенсивність теплообміну, коли невідомі теплофізичні властивості робочого середовища. Це принципово новий підхід до використання теорії подібності.

В БГУ використовується значна кількість комбінацій сумішей. Конструкцій теплообмінних поверхонь, які можуть застосовуватись в обладнанні БГУ, також досить багато. 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 модель робочої рідини. В цьому випадку під час розробки обладнання БГУ використовується поєднання фізичного і математичного моделювання.

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. Тобто, для відповідного розрахунку k -го елемента підключаються потрібні модулі, які містять залежності для розрахунку (або умови у вигляді нерівностей для прогнозування) всіх можливих дієздатних варіантів виконання елемента, в рамках заданої системи обмежень.

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

— термодинамічний (температура робочого тіла в реакторі, змішувачі, температура стінки реактора):

$$\begin{aligned} t_0 + \Delta t &\geq t_{PP} \geq t_0 - \Delta t; \\ t_{PP} + \Delta t &\geq t_{P3} \geq t_{PP} - \Delta t; \\ t_0 + \Delta t &\geq t_{P\text{ТОТС}} > t_0; \\ W_{PP} &= W_{P3}, \end{aligned} \quad (8)$$

де t_{PP} , t_{P3} , $t_{P\text{ТОТС}}$ — температура робочого тіла в реакторі, змішувачі та теплообміннику термостабілізації реактора, відповідно, °С; t_0 — оптимальна робоча температура технологічного процесу для відповідного режиму зброджування, °С; Δt — допустиме відхилення температури субстрату від оптимальної, °С; W_{PP} , W_{P3} — вологість робочого тіла в реакторі і в змішувачі, відповідно, %;

— витратний (кількість завантаженої суміші за добу, кількість завантажень за добу, витрата води на технологію):

$$V_3 = V_B; \quad V_3 = 0,1V_{PP}, \quad (9)$$

де V_3 , V_B — об'єми завантаженого і вивантаженого робочих тіл за добу, відповідно, $\text{м}^3/\text{добу}$; V_{pp} — об'єм робочого тіла в реакторі, м^3 ;

— конструктивний (форма і геометричні співвідношення реактора, змішувача, теплоутилізатора), наприклад: у випадку циліндричної форми реактора вертикального виконання $0,8 \leq \phi_p \leq 1,1$, де ϕ_p — відношення висоти до діаметра резервуару реактора.

Об'єкт-гіпотеза

В практиці проектування часто використовується ітеративний метод синтезу рішень. На першому етапі синтезу генерується об'єкт-гіпотеза, якість якого попередньо недостатньо відома, а на другому етапі ця гіпотеза перевіряється і оцінюється [2]. Запропонована нами математична модель використовується тоді, коли сформовано об'єкт-гіпотезу. В цьому випадку як об'єкт-гіпотеза подана система БГУ з утилізацією теплоти відпрацьованої суміші (рис. 1) (прогресивна схема БГУ). В елементах БГУ (див. рис. 1) відбуваються такі робочі процеси: механічні, гідродинамічні, масообмінні, теплообмінні, біохімічні, біотехнологічні. З усіх робочих процесів, що відбуваються в обладнанні БГУ, розглядаємо тільки теплогідродинамічні процеси. Біохімічні процеси враховуються в цьому випадку завдяки обмеженням температури і параметра q .

З використанням запропонованої методики математичного моделювання, було визначено зовнішні матеріальні і теплові потоки (обмін матеріальними і тепловими потоками між системою БГУ і зовнішніми системами), внутрішні потоки суміші і проаналізовано функцію ψ^* . Безрозмірний параметр ψ^* , який характеризує частку біогазу на власні потреби, визначає ступінь досконалості теплової схеми БГУ.

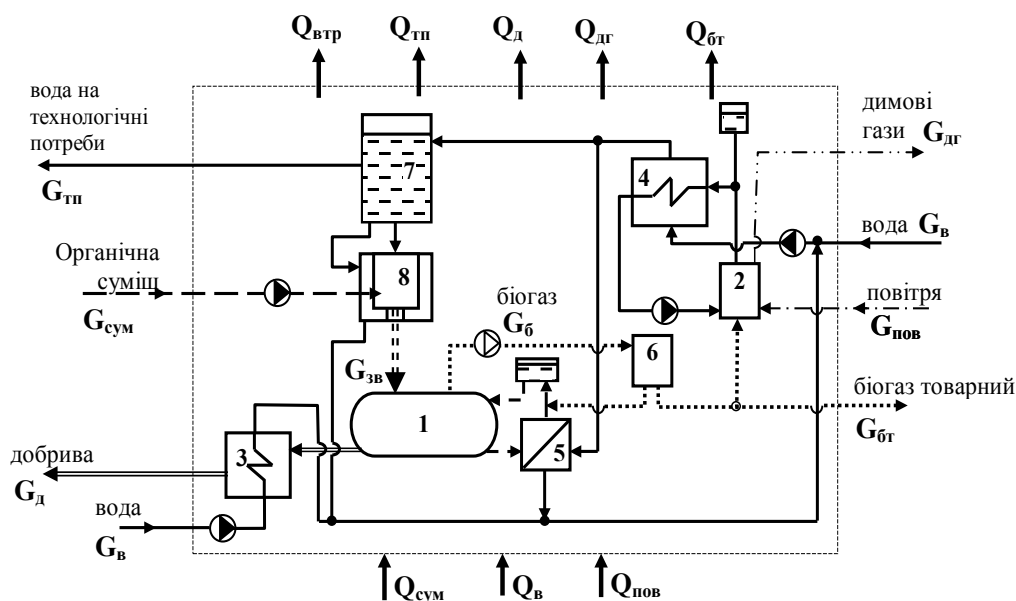


Рис. 1. Об'єкт-гіпотеза: система БГУ, вхідні та вихідні матеріальні і теплові потоки: 1 — біореактор (Б); 2 — водогрійний котел (К); 3 — теплоутилізатор відпрацьованого субстрату (ТУВС); 4 — теплообмінник (ТО); 5 — теплообмінник термостабілізації реактора (ТОТС); 6 — газгольдер; 7 — бак акумулятор (БА); 8 — змішувач (ЗМ)

Початкові дані

Для визначення матеріальних потоків початковими даними взято: вид і витрату органічної суміші і її характеристики (мелясна барда, витрата $6700 \text{ кг}/\text{добу}$, вологість 88%); витрату води на технологічні потреби ($10 \text{ м}^3/\text{добу}$). Режим роботи БГУ безперервний. Початкові дані для розрахунку функції ψ^* :

1) геометричні характеристики реактора: форма — циліндрична; об'єм $V_p = 100 \text{ м}^3$; зовнішній діаметр $D_p = 5 \text{ м}$; товщина стінки $\delta = 0,006 \text{ м}$; співвідношення висоти до діаметра резервуару реак-

тора $\varphi = H/D = 1$;

2) характеристики ізоляції реактора: товщина ізоляції $\delta_{із} = 0,05$ м; теплопровідність ізоляції $\lambda_{із} = 0,05$ Вт/(мК);

3) температурні режими: робоча температура в реакторі $t_p = 35$ °С; початкова температура нової дози відходів, що подаються на підготовку $t_{зм} = 25; 15; 5$ °С за температури навколишнього середовища $t_{нс} = 0; -10; -20$ °С, відповідно; середній температурний напір в теплоутилізаторі у випадку повної утилізації теплоти $\overline{\Delta t_{ту}} = 10$ °С, у випадку часткової утилізації — $\overline{\Delta t_{ту}} = 5$ °С;

4) особливості технологічного процесу: частка нового завантаження за добу складає 10 % об'єму робочої суміші в реакторі; інтенсивність зброджування — кількість виробленого біогазу з одиниці об'єму реактора за добу, становить $q = 1$ м³/(м³добу).

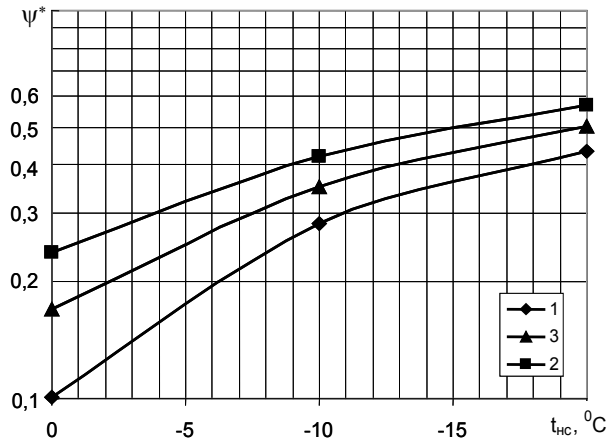


Рис. 2. Залежність ψ від $t_{нс}$: 1 — з повною утилізацією теплоти відпрацьованої суміші; 2 — без утилізації; 3 — з 50 % утилізації

Результат розрахунку матеріальних потоків

В табл. 1 наведено результати розрахунку обміну матеріальними потоками між системою БГУ та навколишніми системами у разі повної утилізації теплоти відпрацьованої суміші.

Таблиця 1

Обмін матеріальними потоками між системою БГУ та навколишніми системами

| Матеріальні потоки | Надходять в систему БГУ | Виходять із системи БГУ |
|--------------------------|--|---|
| Вода, кг/добу | Загальна кількість, що входить в систему $G_B = 13300$ | На технологічні потреби $G_{тп} = 10000$ |
| Органічна суміш, кг/добу | $G_{сум} = 6700$, вологість 88 % Сухих органічних речовин: $G_{сум} = 643$ кгСОР/добу | — |
| Добрива | — | $G_d = 9874$ кг/добу Сухих органічних речовин: $G_d = 526$ кгСОР/добу |
| Повітря, кг/добу | $G_{пов} = 632...830$ | — |
| Біогаз товарний, кг/добу | — | $G_{бр} = 38...56$ |
| Димові гази, кг/добу | — | $G_{др} = 714...940$ |

В схемі БГУ (див. рис. 1) можна виділити основний матеріальний потік органічної суміші, потік води є додатковим потоком, який забезпечує тепловологісний режим БГУ. Органічна суміш надходить в елемент 8, де відбувається розбавлення суміші до заданої вологості, при цьому до відходів додається $\Delta G_B = 3300$ кг/добу води. Із елемента 8 в 1 подається $G_{зв} = 10000$ кг/добу робочої суміші з вологістю 92 %, сухих органічних речовин 640 кгСОР/добу. Із елемента 1 в 3 надходить $G_d = 9874$ кг/добу (сухих органічних речовин 553 кгСОР/добу) отриманих добрив. Кількість виробленого біогазу дорівнює $G_6 = 100$ м³/добу.

Результат розрахунку теплових потоків

Тепловими потоками, що виходять із системи БГУ є тепловтрати з поверхні ізоляції обладнання

БГУ (див. рис. 1) і витрати теплоти з матеріальними потоками (табл. 2). Основну частину тепловтрат складають тепловтрати з поверхні елемента 1. Величина тепловтрат іншого теплотехнологічного обладнання і трубопроводів складає 30...70 % від тепловтрат елемента 1 і залежить від досконалості конструкцій обладнання, наявності теплоізоляції. Величина витрат теплоти з матеріальним потоком добрив які виходять із 3, залежить від ступеня теплоутилізації (повна, часткова утилізація). Тепловими потоками, що надходять в систему БГУ, є потоки із сумішню відходів, що подається в 8, водою, що надходить в 3 і 4, повітрям, що подається в елемент 2. На рис. 2 показано залежність параметра ψ^* від температури навколишнього середовища. Із графіка видно, що витрата біогазу на власні потреби зі зменшенням температури навколишнього середовища від 0 до $-20\text{ }^\circ\text{C}$ збільшується на 60...75 %. За 100 % утилізації теплоти спостерігається збільшення виходу товарного біогазу на 14...15 %, за 50 % утилізації — на 7...8 %. Теплоутилізація суттєво зменшує витрату біогазу на власні потреби за вищих температур навколишнього середовища.

Таблиця 2

Обмін тепловими потоками між системою БГУ та навколишніми системами

| Теплові потоки | Надходять в систему БГУ з матеріальними потоками, кВт | Виходять із системи БГУ | |
|--|---|--|--|
| | | Тепловтрати з поверхні ізоляції $Q_{\text{втр}}$, кВт | Витрати теплоти з матеріальними потоками, кВт |
| 1. Біореактор | — | 2,5...4,0 | — |
| 2. Водогрійний котел | Повітря $Q_{\text{пов}} = 0,024...0,040$ | 0,75...2,80 | Димові гази $Q_{\text{дг}} = 1,4...1,8$ |
| 3. Теплоутилізатор відпрацьованого субстрату | Вода (загальна кількість, що входить в систему) $Q_{\text{в}} = 1,9...3,2$ | | Добрива після ТУ $Q_{\text{д}} = 5...7$ |
| 4. Теплообмінник | — | | — |
| 5. Теплообмінник термостабілізації реактора | — | | — |
| 6. Газгольдер | — | | Біогаз товарний $Q_{\text{от}} = 0,005...0,008$ |
| 7. Бак акумулятор | — | | Вода на технологічні потреби $Q_{\text{тп}} = 20$ |
| 8. Змішувач | Суміш відходів $Q_{\text{сум}} = 2...5$ | | — |
| Трубопроводи | — | | — |

Висновки

1. В результаті створення методичного забезпечення математичного моделювання робочих процесів в БГУ отримали подальшого розвитку методи математичного моделювання теплотехнологічних схем БГУ. Взято до уваги особливості біогазових технологій. Запропоновано критерій якості системи ψ^* , який характеризує частку біогазу на власні потреби, тобто характеризує ступінь досконалості теплової схеми БГУ і враховує біотехнологічні, гідродинамічні та механічні процеси.

2. Враховано, що робоче середовище в системах біоконверсії може мати різний склад, теплофізичні властивості середовища можуть змінюватись з часом, практично відсутня інформація про теплофізичні властивості. Для вирішення цієї проблеми застосовується ЕРМ. В математичній моделі вперше використовується в комплексі традиційне математичне моделювання і фізичне моделювання на спрощених портативних установках.

3. За допомогою математичної моделі можна розв'язати низку задач: визначити всі зовнішні і внутрішні матеріальні і теплові потоки, тепловтрати, споживання біогазу на власні потреби, вихід товарного біогазу, параметри теплообмінного обладнання, елементів теплообміну тощо. Результати моделювання апробовані на перспективній схемі БГУ з утилізацією теплоти. Виявлено суттєвий вплив наявності і ступеня утилізації теплоти відпрацьованого субстрату на вихід товарного біогазу: у разі повної утилізації теплоти збільшується вихід товарного біогазу на 14...15 %, у випадку частко-

вої утилізації (50 %) — на 7...8 % в порівнянні з режимом без утилізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : моног. / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. — Вінниця : Універсум–Вінниця, 2004. — 132 с.
2. Ткаченко С. Й. Обобщенные методы расчета теплогидродинамических процессов и применение их для оптимизации выпарных установок : дис. ... доктора техн. наук / С. Й. Ткаченко. — Вінниця, — 1987. — 440 с.
3. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин — М. : Энергия, 1978. — 416 с.
4. Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки / [С. Й. Ткаченко, Є. П. Ларюшкін, Г. О. Нудель, В. С. Таргона] // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 1998. — № 2. — С. 48—55.
5. Семенов І. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семенов. — Сумы : ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. — 347 с.
6. Волова Т. Г. Биотехнология / Т. Г. Волова. — Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. — 252 с.
7. Ткаченко С. Й. Тепловіддача до багатоконпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2006. — № 1. — С. 111—114.
8. Ткаченко С. Й. Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії [Електронний ресурс] / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Енергетика та електротехніка. — 2007. — № 1. — Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2007-1/vyp1ru.html>
9. Патент 24616 Україна, МПК7 G01N25/18. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші / Ткаченко С. Й., Резидент Н. В.; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. — №200701190; заявл. 05.02.07; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
10. Ткаченко С. Й. Удосконалення експериментально-розрахункового методу / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Н. В. Резидент // Збірник технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. — 2010. — № 2. — С. 171—183.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Стаття надійшла до редакції 23.02.11
Рекомендована до опублікування 9.03.11

Ткаченко Станіслав Йосипович — завідувач кафедри, **Пішеніна Надія Володимирівна** — аспірантка.

Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця