

ФІНИК І. В.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3254-9236>e-mail: [Finyk\\_Ira@i.ua](mailto:Finyk_Ira@i.ua)

## МЕТОДИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ

Розглянуто методи інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах при використанні альтернативних джерел енергії. Запропоновано розподіл за класами активних і пасивних методів інтенсифікації теплообміну. Виділено три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну: метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку; метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів; метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні труб за допомогою створення на них турбулізаторів. Визначено, що на практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Важливими умовами при виборі методу інтенсифікації теплообміну є: величина допустимих енергозатрат на інтенсифікацію теплообміну і вид наявної для цього енергії; конкретизація задачі інтенсифікації теплообміну в конкретному класі обладнання; технологічність виготовлення обладнання з інтенсифікацією теплообміну, доступність при закупівлі та довговічність в експлуатації обладнання; характер розподілу, структура теплових потоків і температурних полів, в яких виникає потреба інтенсифікації теплообміну. Запропоновано основний економічний показник інтенсифікації процесу теплообміну в обладнанні – економічна ефективність процесу, тобто процес повинен бути економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізольовано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації прийнято ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енергозатрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів. Завдання інтенсифікації теплообміну зазвичай зводяться: до зменшення габаритів та маси теплообмінних пристроїв; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін. Зменшення товщини тепло передаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними ознаками інтенсифікації теплообміну.

Ключові слова: інтенсифікація теплообміну, біогазовий реактор, альтернативне джерело енергії.

Iryna FINYK

Vinnytsia National Technical University

## IMETHODS OF INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN BIOGAS REACTORS

Proposed research method intensification of heat exchange in biogas reactions using alternative energy sources. The distribution of active and passive methods of heat exchange intensification is determined. The three most effective methods of heat exchange intensification are identified: the method of flow turbulence in the adjacent areas, based on purposeful artificial creation of small dry wall zones, which is the source of additional flow turbulence; the method of flow winding inside the twisted oval tubes and at longitudinal and transverse winding of tightly packed beams and tubes; the method of controlled break-out of the boundary layer at transverse tubulars by creating turboblocators on them. It is determined that in practice the most effective is the use of combined methods of intensification. The important conditions for choosing the method of heat exchange intensification are: the amount of permissible energy costs for heat exchange intensification and the type of energy available for this energy; the task of heat exchange intensification in a particular class of equipment; the technological capacity of equipment with heat exchange intensification, availability at purchase and durability in operation of equipment; the nature of distribution, structure of thermal flows and temperature fields, in which there is a need for intensification of heat exchange. The main indicator of intensification of the heat exchange process in the equipment is found – the efficiency of the process, that is, the process should be economically profitable. From the above it appears that the intensification of heat exchange can't be considered isolated from the necessary energy costs. The determining criterion of optimization is the efficiency of the heat exchange process at a given level of energy consumption at transfer of the working environment through the equipment. Heat exchange intensification during use of gaseous working environments is of particular importance, for which characteristic reduction of intensity of heat exchange processes and high energy consumption for removal of supports at pumping of gases is characteristic. Tasks of heat exchange intensification are usually set: to reduce the size and weight of heat exchange devices; to decrease the temperature pressure, i.e. to decrease the temperature of the walls at the given temperature of heat carrier or to increase the temperature of heat carrier at the given temperature of walls. Reduction of thickness of heat transfer wall and increase of its thermal conductivity, as well as prevention waste contamination on the wall is an obvious method of intensification of heat exchange.

Keywords: heat exchange intensification, biogas reactor, alternative energy source.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні диктує необхідність вирішення однієї з найбільш актуальних проблем – зменшення енергоспоживання, в першу чергу зменшення використання природного газу, нафти і вугілля. Розвиток та нові прогресивні здобутки сільства стають неможливими без енергозатрат. На сьогодні навіть мінімальна людська діяльність не здійснюється без використання енергії. Найменше, що загрожують людству в майбутньому, при використанні традиційних енергоресурсів в темпі сьогоднішнього дня, це зменшення запасів енергосировини і збільшення розцінок на паливо. При постійному зрості вартості звичних для нас

видів палива, а також зменшенні видобутку зростає потреба у використанні альтернативних джерел енергопостачання, які хоча б частково зможуть задовольнити постійно зростаючу потребу в енергоресурсах. Альтернативні джерела енергії є саме такими джерелами енергії, що постійно поновлюються. Одним із шляхів альтернативного енергопостачання є використання процесів анаеробного бродіння в біогазових реакторах. Біогаз – суміш газів, основною складовою якого є метан, може використовуватися як паливо. Але зменшення споживання енергії на виробництво біогазу, зменшення капітальних витрат на будівництво реакторів, покращення процесів бродіння можна досягнути шляхом інтенсифікації теплообмінних процесів між нагрівальним елементом реактора і субстратом. Сучасні реалії нестабільності в багатьох сферах життя потребують більш детального дослідження практичного використання відновлювальних видів енергії і визначення оптимальних методів для інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах, застосовуючи альтернативні джерела енергії [1].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення та класифікація оптимальніших методів інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах за використання альтернативних джерел енергії.

### Виклад основного матеріалу

Проблема ефективного та раціонального використання паливних енергоресурсів є однією з найважливіших на сьогоднішній день. Важливу роль у вирішенні цієї проблеми може внести поширення застосування ефективних методів інтенсифікації теплообміну при розробці і виготовленні обладнання [2]. На даний час розроблені та досліджуються найрізноманітніші методи інтенсифікації теплообміну. Принципово їх класифікують на два типи: пасивні та активні. Пасивний тип інтенсифікації: впливання на потік формою поверхні теплообміну, застосування вставних інтенсифікаторів, різнотипне оребрення поверхні теплообміну. Пасивний тип інтенсифікації теплообміну можна умовно поділити на наступні основні групи: надання потоку рідини обертально-поступального руху; руйнування пристінних шарів рідини; збільшення поверхні теплообміну. Активний тип інтенсифікації: застосування механічного впливу на теплообмінну поверхню, вплив на потік електричними акустичними чи магнітними полями, тисковими пульсаціями, відсмоктуванням або вдуванням робочого середовища через пористу поверхню. Перший спосіб полягає у створенні закрученого руху потоку за допомогою стрічкових, шнекових та пластинчастих завихрювачів. Такі завихрювачі впливають на весь потік. Другий спосіб полягає у впливові на пристінну область течії за рахунок штучної шорсткості у вигляді різного типу накаток на внутрішній стінці труб, дротяних спіралей тощо [3].

Проводячи дослідження виникає можливість виділити три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну:

1. Метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку [4]. Процес турбулізації потоку гомогенізує гетерогенні системи і інтенсифікує технологію отримання двохфазних середовищ. Для надання характеристики даній методиці, слід звернутися до рівняння Нав'є-Стокса, не приймаючи до уваги прискорення поля зовнішніх масових сил та перепад тиску в об'ємі рідини, оскільки вони мізерні в порівнянні з інерційними силами і силами тертя. Нехтуючи вищезгаданими величинами рівняння матиме такий вигляд :

$$\frac{Dw_i}{d\tau} = \nu \nabla^2 w_i, i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де  $D$  – оператор диференціювання;  $w_i$  – кутова швидкість;  $\tau$  – час;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $\nabla$  – оператор Набла,  $d$  – діаметр каналу [5].

2. Метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів [4]. Щоб характеризувати інтенсивність закрутки потоку запропоновано параметр (2):

$$n = \frac{8 \cdot M_{сер}}{\pi \cdot K_{сер} \cdot d}, \quad (2)$$

де  $M_{сер}$  – момент кількості руху потоку (середнє значення);  $\pi$  – математична константа, 3,14;  $K_{сер}$  – кількість руху (середнє значення).

На основі дослідження можна припустити, що інтенсивність закручування потоку завихрителем доцільно характеризувати рівнянням (3):

$$\Phi_{0_{\alpha}}^{\Gamma} = \frac{M}{(K_1 + K_2) \cdot R}, \quad (3)$$

де  $\Phi_{0_{\alpha}}^{\Gamma}$  – інтенсивність закручування потоку завихрителем;  $K_1$  – осьова кількість руху;  $K_2$  – кількість руху закрученої течії;  $R$  – радіус каналу.

Для шнекового завихрителя, з кроком по довжині і прямокутною канавкою актуальним буде дане рівняння (4):

$$\Phi_{0_{\text{ак}}}^{\Gamma} = \frac{1 + \bar{d}_0^2}{1 + \bar{d}_0} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{сеп}}, \quad (4)$$

де  $\varphi_{\text{сеп}}$  – геометричний кут закручування на середньому значенні діаметру.

Реальне значення інтенсивності закручування потоку відрізнятиметься від наведених формул. Це зумовлено нерівністю швидкостей полів в каналах завихрителів, гідравлічними втратами на тертя. Для шнекового завихрителя з прямокутною канавкою, рівняння, що пов'язує дійсний і розрахунковий метод матиме такий вигляд (5) [5]:

$$\Phi_{0_{\text{ак}}} = 1,28 \cdot \Phi_{0_{\text{ак}}}^{\Gamma 0,75}, \quad (5)$$

3. Метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні пучків труб за допомогою створення на них турбулізаторів [4].

Для біогазових реакторів анаеробного бродіння характерні процеси, які протікають під впливом рушійної сили, визначеної різницею концентрації, тиску, швидкості, температури, зовнішнього та внутрішнього силових полів. Аналізуючи процес, можемо представити рівняння (6) в такому вигляді:

$$R = \kappa \cdot x \cdot A \cdot \tau, \quad (6)$$

де  $R$  – результативність процесу;  $\kappa$  – коефіцієнт пропорційності, характеризуючий швидкість процесу;  $x$  – інтенсивність процесу;  $A$  – рушійна сила;  $\tau$  – час процесу.

Інтенсивність процесу є пропорційною рушійній силі процесу і обернено пропорційній опорі. З цієї залежності можемо вивести рівняння (7):

$$R = \frac{\kappa \cdot x \cdot A}{r}, \quad (7)$$

де  $r$  – опір.

З метою інтенсифікації теплообміну, пропонується застосування анаеробних метаногенеруючих реакторів з іммобілізацією на твердих носіях мікроорганізмів.

Інтенсифікація теплообміну всередині шару стає можливою при зміні поза шаром концентрації субстрату. Масообмін поза шаром відбувається за допомогою дифузії, визначеної різницею градієнтів тиску і швидкості. При зміні тиску в потоці субстрату стає можливою інтенсифікація виділення газу, рух якого до поверхні стимулює масообмін. Інтенсифікація виділення газу підтверджується законом Генрі (8), згідно з яким кількість газу, що розчиняється в рідині при коефіцієнті розчинності газу є прямопропорційною абсолютному тиску в рідині:

$$W_g = K_G \cdot P, \quad (8)$$

де  $W_g$  – кількість газу;  $K_G$  – константа Генрі;  $P$  – абсолютний тиск в рідині.

Основні рушійні сили поза шаром в анаеробних реакторах, є рушійними силами визначеними різницею швидкості і тиску. Інтенсифікація теплообміну можлива за рахунок оптимізації рушійних сил [5].

На сьогоднішній день використовуються різні типи методи інтенсифікації теплообміну. На практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Необхідно звернути увагу, що при практичному застосуванні методів інтенсифікації теплообміну виникає потреба враховувати не лише ефективність методу, а й особливості експлуатації та вартість обслуговування конструкції. Будь-який ефективний метод інтенсифікації теплообміну може бути реалізований лише тоді, коли розроблена прийнятна для серійного виробництва технологія виготовлення обладнання. Важливими умовами при виборі методу інтенсифікації теплообміну є:

1. Величина допустимих енергозатрат на інтенсифікацію теплообміну і вид наявної для цього енергії.
2. Конкретизація задачі інтенсифікації теплообміну в даному класі обладнання.
3. Технологічність виготовлення обладнання з інтенсифікацією теплообміну, доступність при закупівлі та довговічність в експлуатації обладнання.
4. Характер розподілу, структура теплових потоків і температурних полів, в яких виникає потреба інтенсифікації теплообміну [6].

Інтенсивність процесу теплообміну в обладнанні визначається відношенням теплової продуктивності апарату до основних величин, які характеризують рушійну силу процесу і розмір приладу. Для установки відповідно, інтенсивність визначається відношенням кількості переданого тепла за одиницю часу до температурного напору і площі поверхні теплообміну. Загальна інтенсивність процесу теплопередачі через

стінку дозволяє характеризувати коефіцієнт теплопередачі  $-k$ . Для плоскої стінки  $k$ ,  $\frac{Bm}{m^2 * K}$ , описується рівнянням (9):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9),$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від нагрітого середовища до стінки, і навпаки,  $\frac{Bm}{m^2 * K}$ ;  $\delta_1, \delta_2, \delta_{cm}$  – товщина шарів сторонніх відкладень на стінці зі сторони гріючого середовища і нагріваючої стінки,  $m$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{cm}$  – теплопровідність відкладень на стінках зі сторони гріючого середовища і нагріваючої стінки,  $\frac{Bm}{m * K}$ .

Аналізуючи рівняння (9) можна зробити висновок, що коефіцієнт теплопередачі або ступінь інтенсивності теплообміну залежить в значній мірі від найбільшого із термічних опорів. Отже, для інтенсифікації процесу теплообміну необхідно перш за все зменшити термічний опір з тієї сторони, з якої він являється найбільшим. Зазвичай найбільший термічний опір мають  $\frac{1}{\alpha_1}$  або  $\frac{1}{\alpha_2}$ .

Переміщення робочих середовищ і інтенсифікація теплообміну нерозривно пов'язані з енергозатратами на їх реалізацію. Інтенсифікація процесів теплопередачі призводить до зменшення необхідної площі поверхні теплообміну, габаритних розмірів обладнання, їх металоемності і вартості. Відповідно, можна знизити вартість закупки, експлуатації та ремонту пристроїв, тобто зменшити наведені затрати на процес теплообміну. Основний економічний результат інтенсифікації процесу теплообміну в обладнанні – це економічна ефективність цього процесу, тобто процес повинен бути економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізолювано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації є ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енерговитрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів [7].

Як приклад, можна розглянути біогазовий реактор з інтенсифікацією теплообміну зображений на рис. 1. В даному реакторі Інтенсифікація теплообміну в надає можливість зменшити площу теплообмінного апарату в реакторі, знизити собівартість біогазового реактора та призвести до термостабілізації процесу бродіння [8].

За типом конструкції біогазові установки поділяються на одnoreакторні і багатореакторні. Перевагою багатореакторної установки є можливість роботи з субстратами швидкого розщеплення, які мають схильність до гідролізу і окислення і потребують використання двохступеневої технології, за допомогою якої досягається більший рівень виробництва біогазу [9].

Технологічно найважливішою конструкцією в біогазовій установці є створення досконалого біогазового реактору – спеціально утепленої ізолюваної ємності, в яку завантажується біомаса (вручну або за допомогою навантажувачів), де сформовані особливі умови для процесу сприяючого активному розвитку і життєдіяльності анаеробних бактерій – анаеробного зброджування. Такий резервуар забезпечує вивід отриманого в результаті діяльності бактерій біогазу – газу, отриманого за допомогою бродіння біомаси.

Призначенням такого обладнання є формування необхідних умов для нормального функціонування культивованих бактерій і видалення газу, отриманого в результаті цієї життєдіяльності. Для забезпечення нормального протікання процесів бродіння потрібно створити необхідні умови в біогазовому реакторі: термофільний, мезофільний чи кріофільний температурний режим бродіння субстрату, необхідний рівень рН та концентрації сухої речовини.

Також необхідно забезпечити низьку концентрацію токсичних сполук і необхідну площу поверхні окремих частинок переробленої біомаси. З метою прискорення ферментаційної реакції окремих груп сировини потрібне застосування гідролізного реактора і 2-ступінчастої технології. Це дозволяє правильно контролювати параметри рН. Накопичений біогаз очищають і відправляють споживачам. Один кубічний метр біогазу в перерахунку на теплоту згоряння відповідає: 0,75 м<sup>3</sup> природного газу; 0,61 кг бензину; 0,72 кг мазуту; 1,48 кг дров [10, 11].

Найбільш ефективними вважаються біореактори, які працюють в термофільному режимі 43–62°C. На таких установках з трьохденною ферментацією вихід біогазу складає 4,5 л на кожен літр корисного об'єму біореактора.

Завдання інтенсифікації теплообміну зазвичай зводяться до зменшення габаритів та маси теплообмінних пристроїв; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін.

Зменшення товщини теплопередаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними методами інтенсифікації теплообміну [2].

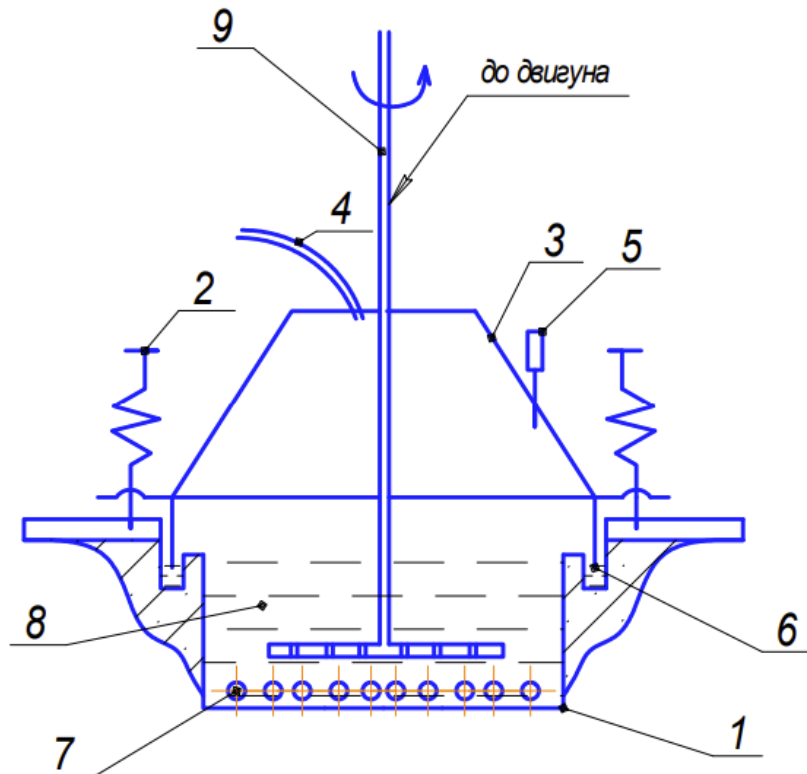


Рис.1 Типова конструкція біогазового реактора з інтенсифікацією теплообміну : 1- корпус реактора, 2 напрямні ковпака, 3 – кришка реактора, 4 – труба відведення газу, 5 - манометр, 6- гідрозатвор, 7 – нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 – активатор теплообміну - мішалка [2]

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Встановлено, що важливе значення у вирішенні проблеми ефективного та раціонального використання паливних енергоресурсів може внести поширення застосування альтернативних джерел енергії, одним з яких є біогаз. Виробництво біогазу потребує ефективних методів інтенсифікації теплообміну при розробці і виготовленні обладнання біогазових станцій. На даний час розроблені та досліджуються найрізноманітніші методи інтенсифікації теплообміну. Принципово їх класифікують на два типи: пасивні та активні. Проводячи дослідження виникає можливість виділити три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну:

1. Метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку.
2. Метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів.
3. Метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні пучків труб за допомогою створення на них турбулізаторів.

На практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Необхідно звернути увагу, що при практичному застосуванні методів інтенсифікації теплообміну реалізація можлива лише тоді, коли розроблена прийнятна для серійного виробництва технологія виготовлення обладнання, враховується не лише ефективність методу, а й особливості експлуатації та вартість обслуговування конструкції.

Інтенсифікація процесів теплопередачі призводить до зменшення необхідної площі поверхні теплообміну, габаритних розмірів обладнання та маси теплообмінних пристроїв, їх металоємності і вартості; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін.

Відповідно, можна знизити вартість закупки, експлуатації та ремонту пристроїв, зменшити наведені затрати на процес теплообміну і процес стане економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізольовано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації є ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енерговитрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів.

Зменшення товщини теплопередаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними методами інтенсифікації теплообміну.

## Література

1. Ратушняк, Г. С. Дзеджула В.В., *Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2008, 117 с.
2. Ратушняк Г. С., В. В. Дзеджула, *Енергозбереження в системах біоконверсії*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2006. – 87 с.
3. Горшенин А. С. *Методы интенсификации теплообмена*. Самара, Россия: Самар.гос.техн.ун-т, 2009, 82 с.
4. Белозерцев В.Н. и др. *Интенсификация теплообмена*. Самара, Россия: Самарский университет, 2018, 208 с.
5. Куріс Ю. В., Червоний І. Ф., *Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти*. Запоріжжя, Україна: ЗДІА, 2010, 489 с.
6. Жукаускас А. А., Калинин Э. К., Ред., *Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи 2*. Вильнюс, Литва: Моклас, 1988, 189 с.
7. Тихонравов В.С., *Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве*. М: Росинформгротех, 2011, 52 с.
8. Семененко И. В. *Проектирование биогазовых установок*. Украина, Сумы: "Мрия-1", 1996, 347 ст.
9. А.Г. Веденев, Т.А. Веденева, *Руководство по биогазовым технологиям*. Бишкек, Кыргызстан: «ДЭМИ», 2011, 84 ст.
10. Семененко И.В., Зинченко М.Г. *Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов*– Україна, Харьков : НТУ «ХПИ», 2012, 272 ст.
11. Financial support of industrial enterprise's innovative directions of energy saving : Monograph [Electronic resource] / I. Yu. Yepifanova, V. V. Dzhezdzhula. Vinnytsia: VNTU, 2022. 138 p.

## References

1. Ratuszniak, H. S. Dzhezdzhula V.V., *Intensyfikatsiia biokonversii kolyvalnym peremishuvanniam substratu*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2008, 117 s.
2. Ratuszniak H. S., V. V. Dzhezdzhula, *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2006. – 87 s.
3. Horshenyn A. S. *Metody yntensyfykatsyy teploobmena*. Samara, Rossyia: Samar.hos.tekhn.un-t, 2009, 82 s.
4. Belozertsev V.N. y dr. *Yntensyfykatsiia teploobmena*. Samara, Rossyia: Samarskyi unyversytet, 2018, 208 s.
5. Kuris Yu. V., Chervonyi I. F., *Biohazovi tekhnolohii. Enerhetychni ta ekolohichni aspekty*. Zaporizhzhia, Ukraina: ZDIA, 2010, 489 s.
6. Zhukauskas A. A., Kalynyn Э. К., Red., *Yntensyfykatsiia teploobmena. Uspekhy teploperedachy 2*. Vylnius, Lytva: Mokslas, 1988, 189 s.
7. Tykhonravov V.S., *Resursosberehaiushchye byotekhnolohyy proyzvodstva alternatyvnykh vydiv toplyya v zhyvotnovodstve*. M: Rosynformahrotekh, 2011, 52 s.
8. Semenenko Y. V. *Proektyrovanye byohazovyykh ustanovok*. Ukrayna, Sумы: "Mryia-1", 1996, 347 st.
9. A.H. Vedenev, T.A. Vedeneva, *Rukovodstvo po byohazovym tekhnolohiyam*. Byshkek, Кыргызстан: «ДЭМУ», 2011, 84 st.
10. Semenenko Y.V., Zynchenko M.H. *Oborudovanye y protsessy metanovoho sbrazhyvanyia orhanycheskyykh otkhodov*– Ukrayna, Kharkov : NTU «KhPY», 2012, 272 st.
11. Financial support of industrial enterprises innovative directions of energy saving : Monograph [Electronic resource] / I. Yu. Yepifanova, V. V. Dzhezdzhula. Vinnytsia: VNTU, 2022. 138 p.