

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

## ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 536.243

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289674

О.В. Власенко<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8975-0873

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ТА ТЕОРІЇ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ

*Властивості кожної рідини можуть бути охарактеризовані цілим комплексом різноманітних фізичних величин: значеннями щільності, в'язкості, електропровідності, теплосмності, поверхневого натягу і т.д. На сучасному етапі розвитку технологій вимір в'язкості рідини є актуальним завданням в різних областях життєдіяльності людини: автомобільній, нафтогазовій, авіаційній, харчовій, медичній та ряді інших галузях промисловості.*

*В'язкість (внутрішнє тертя) – це властивість текучих тіл (рідин і газів) чинити опір переміщенню однієї їх частини щодо іншої. В'язкість – величина непостійна та змінюється в залежності від температури рідинного середовища, наявності в її складі домішок та значення ресурсу. Вона може бути кінематичною, динамічною, умовною та питомою. Однак найчастіше користуються показниками кінематичної або динамічної в'язкості.*

*Експериментальні результати визначення в'язкості одержані на стенді, який являється складовою експериментально-розрахункового методу. Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини – зовнішня та внутрішня.*

*Для опису теплообміну до трифазних середовищ були розроблені критеріальні рівняння в першому і другому наближенні, які складаються з критеріїв подібності, а саме критерія Рейнольдса та критерія Прандтля.*

*Визначено в'язкість в першому наближенні з використанням критеріального рівняння для «модельних рідин», та в другому наближенні з використанням критеріального рівняння, одержаного сумісно для «модельних рідин» і субстрату. Різниця між в'язкістю, знайденої в двох наближеннях, складає до  $\pm 30 \dots 40\%$ .*

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

#### **Вступ.**

Біогазові технології – багатотоннажне виробництво. В них застосовуються великі об'єми субстрату, теплофізичні властивості якого невідомі. На сучасному розвитку біогазових технологій виникають питання по термостабілізації процесу і прогнозуванню інтенсивності теплообміну. На виробництвах – велика увага приділяється питанню сталого температурного режиму в біореакторі. Під час експлуатації біогазової установки необхідно забезпечити стабільний температурний режим за умов різних температур навколишнього середовища. Основним в біореакторі є те, що коливання температур не повинно виходити за визначені температурні діапазони (рис. 1) [1].

Процеси тепло-масопереносу недостатньо досліджені в біогазових технологіях, адже субстрат різноманітний. Для ефективного виходу біогазу потрібно знати інтенсивність теплообміну до субстрату, який мінливий, і якого в реакторі тонни. Субстрати – є багатофазним багатокомпонентним середовищем [2].

Субстрати та компоненти субстрату, які застосовуються в біогазових технологіях [4]: гній ВРХ природній (88% вологість); гній свинний самосплавний (95% вологість); гній великої рогатої худобисамосплавний (95% вологість); гній свинний природній (85% вологість); пташиний послід з клітки (75% вологість); пташиний послід підстилковий (60% вологість); солома; силос кукурудзяний; молочна сироватка (94% вологість); фруктовий і овочевий жом (80% вологість); зерно, борошно, хліб; буряковий жом (75% вологість); барда зернова (93% вологість); меляса; барда мелясна (90% вологість); мезга кукурудзяна (80% вологість); пивна дробина (82% вологість); мезга картопляна (91% вологість); жир з

жироловок (жирова пульпа); жир (чистий, 0% вологість); коренеплідні овочі; відходи бійні; риби відходи; технічний гліцерин; тверді побутові відходи [3-4].

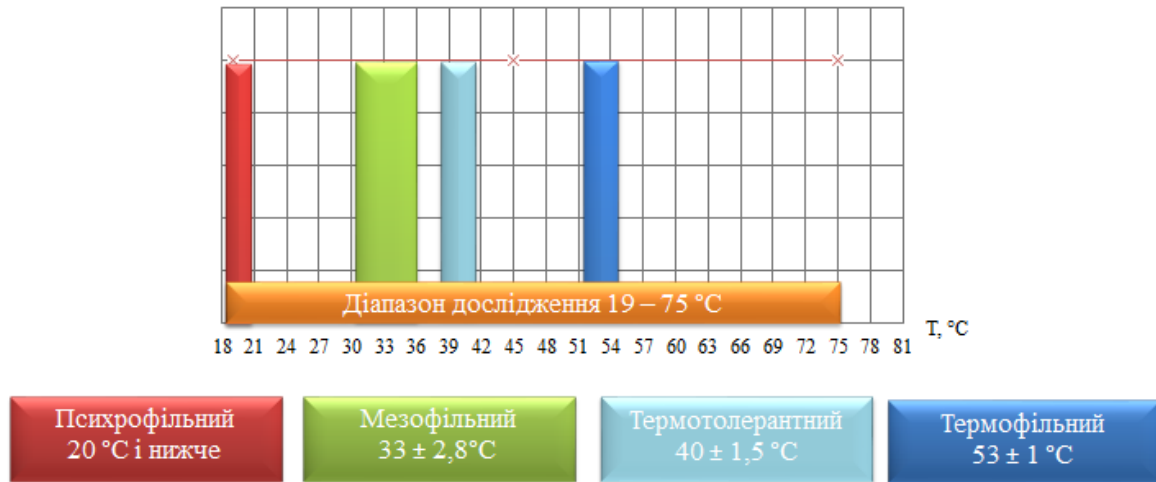


Рисунок 1 – Температурні режими в біореакторі

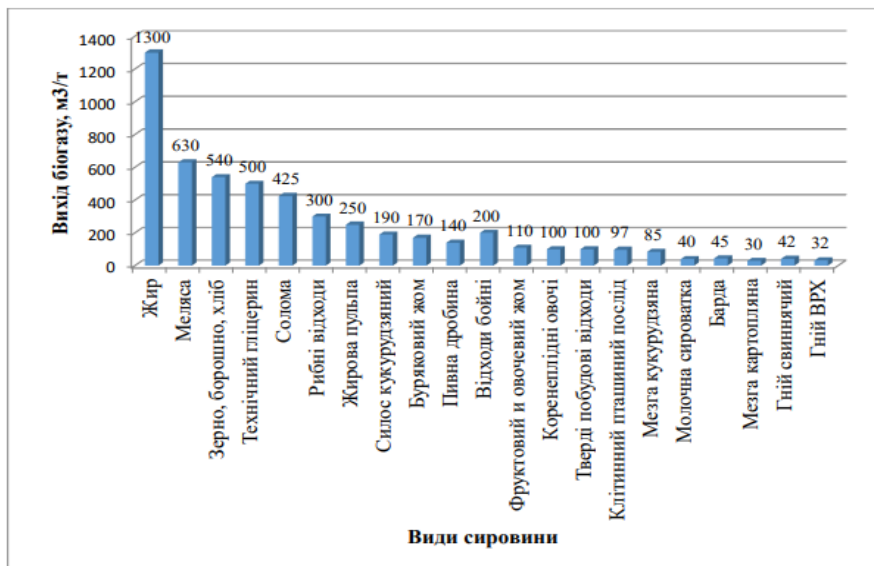


Рисунок 2 – Види сировини, яка застосовується в біогазових технологіях

Проблема створення технічних засобів, що забезпечують надійне і точне вимірювання в'язкості різних рідин таздатних інтегруватися в сучасні системи управління технологічними процесами, залишається досить актуальною. На даний час для вимірювання в'язкості застосовуються такі методи, як ротаційний, капілярний, метод падаючої кульки, вібраційний, ультразвуковий, а також методи пенетрації та пластометрії.

Для визначення в'язкості однофазних середовищ використовують віскозиметри.

**Віскозиметр** - специфічний пристрій для контролю рідин, конкретніше, служить для вимірювання рівня в'язкості різних рідин. Назва походить від латинського viscosus - в'язкий.

Визначення в'язкості віскозиметром використовують у різних галузях науки та виробництва: фармакології (виробництво лікарських препаратів у вигляді густих субстанцій); медицині (вимірювання в'язкості крові); дослідження харчових продуктів (мед, молоко, соки); нафтовому та паливному виробництві (машинне масло, бензин, парафін тощо); лакофарбової та хімічної промисловості (фарби, лаки, смоли).

Віскозиметр Оствальда використовується для визначення в'язкості ньютонівської рідини. При течії рідини під дією сили тяжіння визначається час, необхідний рідині для проходження між двома мітками А і В через капілярну трубку. Час протікання досліджуваної рідини порівнюється з часом, необхідним для рідини відомої в'язкості, в'язкості невідомої рідини[5-7].

Визначення в'язкості (закон рідинного тертя Ньютона). В'язкість описує внутрішній опір потоку рідини (внутрішнє тертя). Він визначається напругою зсуву  $\tau$ , необхідною для зміщення двох пластин, що рухаються одна відносно одної. Чим вище відносна швидкість  $\Delta v$  пластин і чим менша відстань  $\Delta u$  між пластинами, тим більше напруга зсуву. Константа пропорційності між цими величинами  $\epsilon$  (динамічною) в'язкістю [5-8].

Ротаційний віскозиметр. Обмеження рідини між двома пластинами для визначення в'язкості є дуже описовою процедурою, але навряд чи здійсненою на практиці. Як рідина повинна утримуватися в зазорі між двома пластинами? Тому на практиці використовується шпindel, який обертається з постійною швидкістю в циліндричній посудині. Посудина містить рідину, в'язкість якої необхідно визначити. Залежно від в'язкості привід шпинделя вимагає певного крутного моменту. Чим вища в'язкість, тим більший крутний момент необхідний для підтримки постійної швидкості обертання. Цей крутний момент вимірюється безпосередньо на двигуні та може використовуватися для визначення в'язкості після відповідного калібрування. Однак швидкість обертання не повинна вибиратися надто високою, оскільки при надто високих швидкостях розвивається не ламінарний потік, а турбулентний [5-8].

Віскозиметр з падаючою сферою. В'язкість рідини також можна визначити дослідами з кулькою, що занурюється в рідину. Швидкість, з якою м'яч опускається на землю в рідині, безпосередньо залежить від в'язкості рідини. Використовуються в основному рідини. Якщо м'яч опускають у в'язку рідину, швидкість спочатку збільшується, доки протидіюча сила тертя не стане такою ж, як сила ваги м'яча. Для більш точних вимірювань слід також враховувати виштовхувальну силу, спрямовану вгору. Усі три сили врівноважують одна одну в усталеному випадку, і виходить постійна швидкість занурення [5-8].

Віскозиметр з падаючою сферою Хепплера. Віскозиметр з падаючою кулькою Хепплера заснований на методі падаючої кулі, описаному в попередньому розділі. Куля падає на землю в трубці, яка містить досліджувану рідину. Дві маркування прикріплені до трубки, які вказують на визначену відстань вимірювання  $\Delta s$  («відстань падіння»). Час  $\Delta t$ , необхідний для проходження м'ячем цієї вимірювальної відстані, вимірюється за допомогою світлових бар'єрів [5-8].

Віскозиметр з зануреною чашкою. Дуже простим методом визначення в'язкості є чашковий віскозиметр. Цей метод використовує той факт, що вихід рідини через отвір у посудині також залежить від в'язкості. Завдяки високому опору течії високов'язким рідинам потрібен відносно тривалий час, щоб витекти через отвір у занурювальному стакані. Таким чином, для заданого об'єму чашки час, необхідний для витікання рідини, є прямим показником в'язкості [5-8].

**Мета та завдання.** Запропонувати критеріальне рівняння теплообміну для визначення в'язкості трифазного середовища, з обмеженою інформацією з теплофізичних властивостей.

**Матеріал і результати досліджень.**

Інтенсивність конвективного теплообміну визначається тепловими та гідромеханічними явищами. Математичний опис процесу є системою диференціальних рівнянь та умов однозначності [9-10]:

- диференціальне рівняння тепловіддачі

$$\alpha = - \frac{\lambda}{t_c - t_p} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} \quad (1)$$

Рівняння (1) виражає умову теплообміну на межі твердого тіла та рідини та дозволяє визначити коефіцієнт тепловіддачі за відомим полем температур у рідині.

- диференціальне рівняння енергії

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} = w_x \frac{\delta t}{\delta x} + w_y \frac{\delta t}{\delta y} + w_z \frac{\delta t}{\delta z} = \alpha \nabla^2 t. \quad (2)$$

Рівняння енергії (2) виражає закон збереження енергії і встановлює зв'язок між просторовим і тимчасовим зміною температури в рідині, що рухається.

- Рівняння руху. Рівняння руху в'язкості рідини Нав'є-Стокса виражають закон збереження імпульсу дозволяють описати швидкісне поле  $w = f(x, y, z, \tau)$ , складові якого входять у рівняння енергії.

Для просторового (тривимірного) руху рідини

$$\begin{aligned} \frac{dw_x}{d\tau} &= g_x \beta \Delta t - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dw_y}{d\tau} &= g_y \beta \Delta t - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dw_z}{d\tau} &= g_z \beta \Delta t - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Причиною вільного руху рідини є зміна густини залежно від температури. Ця обставина врахована добутком  $\beta \cdot \Delta t$  (у разі лінійної залежності), де  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення.

- Рівняння нерозривності. Рівняння нерозривності виражає закон збереження маси та для стискаючих рідин при  $\rho = \text{const}$  має вигляд:

$$\frac{dw_x}{dx} + \frac{dw_y}{dy} + \frac{dw_z}{dz} = 0 \quad (4)$$

Система рівнянь (1)...(4) є математичним описом цілого класу явищ, які характеризуються однаковим механізмом та фізичною природою, і має бути доповнена умовами однозначності, що визначають форму та розміри твердої поверхні, фізичні властивості рідини, початковий розподіл температури та умови протікання процесу на кордоні. Це дозволяє описати одиничне явище і з множини рішень отримати одне приватне [9-10].

Система рівнянь (1) ... (4) спільно з умовами однозначності являє собою повний математичний опис процесу конвективного теплообміну і дозволяє визначити інтенсивність тепловіддачі і величину теплового потоку, що передається [9-10].

Аналітичне рішення в більшості випадків наштовхується на непереборні математично труднощі і призводить до широкого використання експериментальних досліджень. Недоліком експериментальних досліджень є неможливість використання результатів даного експерименту стосовно іншого явища, яке відрізняється в деталях від вивченого. Ці труднощі долаються з допомогою теорії подоби, що дозволяє основі аналізу математичного описи процесу отримати теоретичне обґрунтування постановки експериментів і обробки експериментальних даних [9-10].

Практичне застосування теорії подібності для процесів конвективного теплообміну полягає в об'єднанні розмірних фізичних величин, представлених системою рівнянь (1)...(4) та умовами однозначності, у безрозмірні комплекси (числа подібності) та розгляд їх як нових змінних. Заміна в рівняннях для двох подібних систем змінних першої системи через змінні другої призводить до цілком певних співвідношень між множниками перетворення і числами подібності [9-10].

Залежність між числами подібності визначається дослідним шляхом та у випадку вимушеного руху рідини має вигляд [9-10]:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}), \quad (5)$$

$\text{deNu}$  – критерій Нуссельта, характеризує відношення між інтенсивністю тепловіддачі і температурним полем в приграничному шарі потоку;

$\text{Re}$  – критерій Рейнольдса, характеризує гідродинамічну подібність (режим течії) при вимушеному русі рідини, є мірою відношення сили інерції до сил внутрішнього тертя;

$\text{Pr}$  – критерій Прандтля, характеризує фізичні параметри середовища є безрозмірним фізичним параметром, який визначається відношенням між розподілом швидкості і температури (відношенням молекулярних потоків імпульсу та енергії).

Експериментальні результати по визначенню в'язкості одержані на стенді, який являється складовою експериментально-розрахункового методу. Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини – зовнішня та внутрішня. На прикладі нагрівання – проведення експерименту здійснювалось таким чином. У зовнішню посудину заливається гаряча вода. У внутрішню посудину – дослідна рідина. Після чого внутрішню посудину розміщаємо в зовнішній і. Рівень рідин в робочих посудинах однаковий. Установка закривається кришкою. Далі проводиться вимірювання температур у зовнішньому та внутрішньому об'ємах через визначений проміжок часу. Дослід закінчується після зрівняння температур 3...5°C. Вимірювання температур теплоносіїв здійснюється термометрами. Фіксування температур відбувається одночасно в десяти точках та автоматично записується в програму Excel [11].

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

Раніше авторами встановлено, що в тілі II, яке складається із рідинного середовища в тонкій металевій циліндричній оболонці, мають місце ознаки регулярного теплового режиму: темп охолодження (нагрівання) тіла II –  $m = \text{const}$ ; коефіцієнт тепловіддачі між водою (навколишнє середовище I) і тілом II практично сталий  $\alpha_1 \approx \text{const}$ ; коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі II  $\psi \approx \text{const}$ . [11-12].

В роботі встановлення існування регулярного теплового режиму в системі «субстрат – тверде тіло». Встановлено сталість темпу охолодження (нагрівання)  $m = \text{const}$ , як характерне для регулярного теплового режиму в твердому тілі (системі з твердих тіл) [13].

Крива (рис. 4-6) представляє апроксимацію дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції  $\text{Ln}\theta = m \cdot \tau + C$ , де  $m$  – темп охолодження (нагрівання),  $C$  – коефіцієнт рівняння,  $R^2$  – коефіцієнт детермінації.

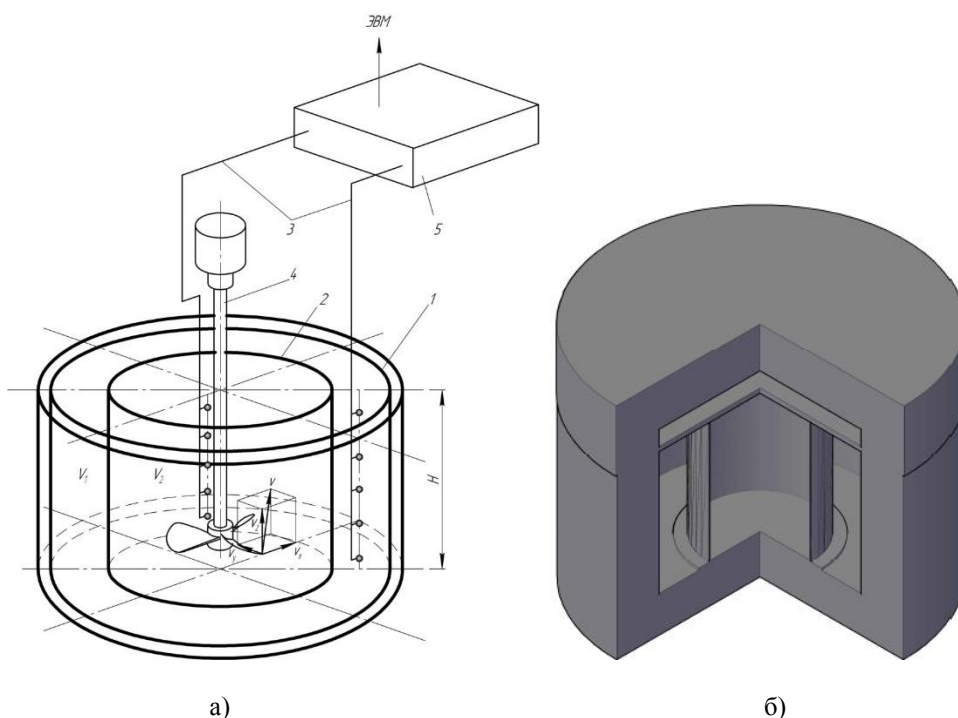


Рисунок 3 – а) схема експериментальної установки 1, 2 – зовнішня та внутрішня посудина; 3 – термопари; 4 – пропелерна мішалка ( $d_m=0,08$  м); 5 – пристрій збору і попередньої обробки сигналів, що надходять від датчиків вимірювання температури; б) схема експериментальної установки в 3D зображенні.

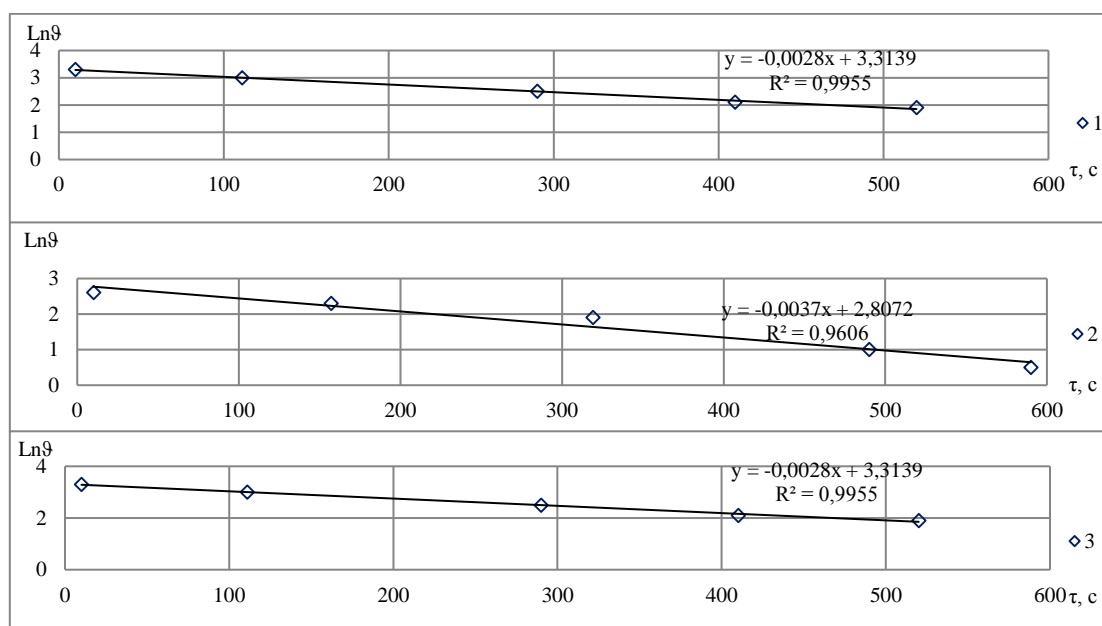


Рисунок 4 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого перед подачею в біореакторі при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; б) 100 об/хв; в) 130 об/хв.

При дослідженні в якості «модельних рідин» прийнято воду та цукровий розчин масової концентрації сухих речовин  $s = 50\%$ ,  $60\%$  з відомими теплофізичними властивостями [14]. В результаті проведення експерименту одержано масив експериментальних даних на «модельних рідинах». В результаті чого з використанням програми *Statistica* биводиться критеріальне рівняння (6) для «модельних рідин», яке описує теплообмін у тонкостінному металевому циліндрі

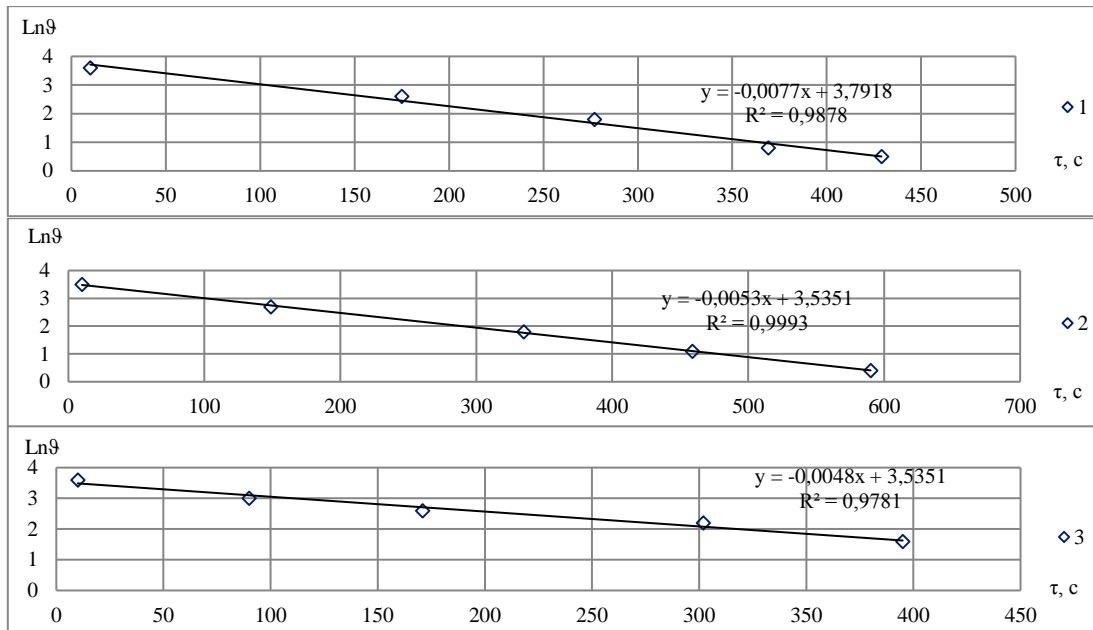


Рисунок 5 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого з біореактора при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; 2) 100 об/хв; 3) 130 об/хв.

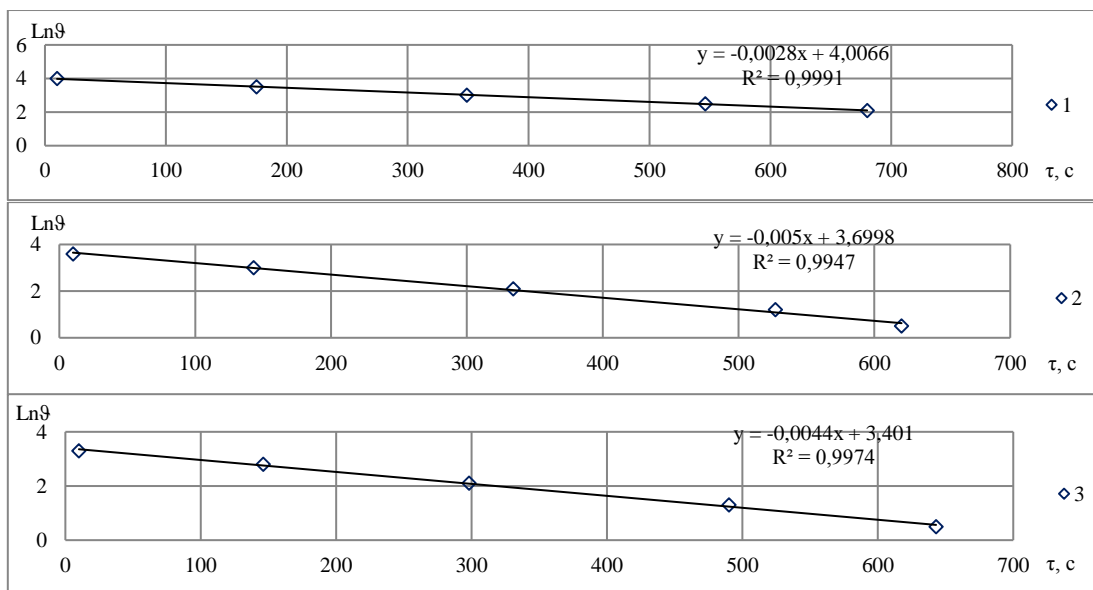


Рисунок 6 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого після біореактора при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; 2) 100 об/хв; 3) 130 об/хв.

$$\overline{Nu}_2 = 0,0387 \cdot Re^{0,625} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (6)$$

яке достовірне в межах  $100 < Re < 14000$ ,  $25 < Pr < 250$ ,

де  $Nu_2$  – критерій Нуссельта;  $Re = \frac{W \cdot H}{\nu}$  – критерій Рейнольдса;  $Pr_p = \frac{\nu}{a}$  – критерій Прандтля для середньооб'ємної температури досліджуваного рідинного середовища;  $\nu$  – кінематична в'язкість досліджуваного рідинного середовища,  $m^2/c$ ;  $a$  – коефіцієнт температурного розширення,  $m^2/c$ ;  $H$  – визначальний лінійний розмір, м.

Вважаємо, що субстрат підпорядковується даному критеріальному рівнянню. Виділяємо комплекс фізичних властивостей КФВ, який складається із п'яти теплофізичних властивостей. Доступними методами визначаємо для субстрату густину  $\rho$ , коефіцієнт температурного розширення  $\beta$ , питому теплоємність  $C_p$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  – визначаємо адитивно.

В наших експериментах поправка  $\left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$  оцінюється в межах 0,97-1,04 під час охолодження та нагрівання досліджуваного рідинного середовища. Тому при отриманні критеріального рівняння на основі наших експериментів поправка  $\left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$  не була використана для врахування напрямку теплообміну.

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння теплообміну для «модельних рідин» на експериментальному стенді (6) приймає вигляд

$$\bar{\alpha}_2^{PrP} = 0,0387 \cdot \bar{w}^{0,62} \cdot l^{-0,38} \cdot K\Phi B_{(-v)} \cdot \nu^{-0,22} \quad (7)$$

де  $\bar{\alpha}_2^{PrP}$  – коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевго циліндра і досліджуваним рідинним середовищем, визначений методом регулярного теплового режиму (PTR);  $\bar{w}$  – умовна характерна швидкість на крайній точці пропелера, м/с;  $l = 0,08$  м – діаметр мішалки;  $K\Phi B_{(-v)}$  – комплекс фізичних властивостей без врахування кінематичної в'язкості  $\nu_2$  досліджуваного рідинного середовища,  $K\Phi B_{(-v)} = \rho_2^{0,4} \cdot Cr_2^{0,4} \cdot \lambda_2^{0,6}$ ,  $\beta_2$  – коефіцієнт температурного розширення, 1/К;  $\rho_2$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $Cr_2$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);  $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов регулярного теплового режиму (PTR)

$$\bar{\alpha}_2^{ptr} = \frac{1}{\frac{1}{k_{експ}} \frac{F \cdot \psi}{m \cdot Cr_1}} \quad (8)$$

де  $m$  – темп охолодження (нагрівання) в досліджуваному рідинному середовищі  $m = (\ln v_1 - \ln v_2) / (\tau_1 - \tau_2) = const$ , де  $v_1, v_2$  – надлишкова середньооб'ємна температура досліджуваного рідинного середовища в циліндричній зі сторони води відповідно в моменти часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ ,  $v = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$ , °С;  $\psi$  – коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі; де  $K_{експ}$  – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площа тонкостінного металевго циліндра, м<sup>2</sup>;  $Cr_1$  – питома теплоємність навколишнього середовища (води), Дж/(кг·К).

В першому наближенні знаходимо кінематичну в'язкість субстрату перед подачею в біогазовий реактор, з реактора та після зброджування в діапазоні температур біотехнологічного процесу. Дослідження проводиться при вимушеній конвекції. Частота обертів пропелерної мішалки – 70 об/хв, 100 об/хв та 130 об/хв. На рис. 7 показано результати визначення в'язкості субстрату.

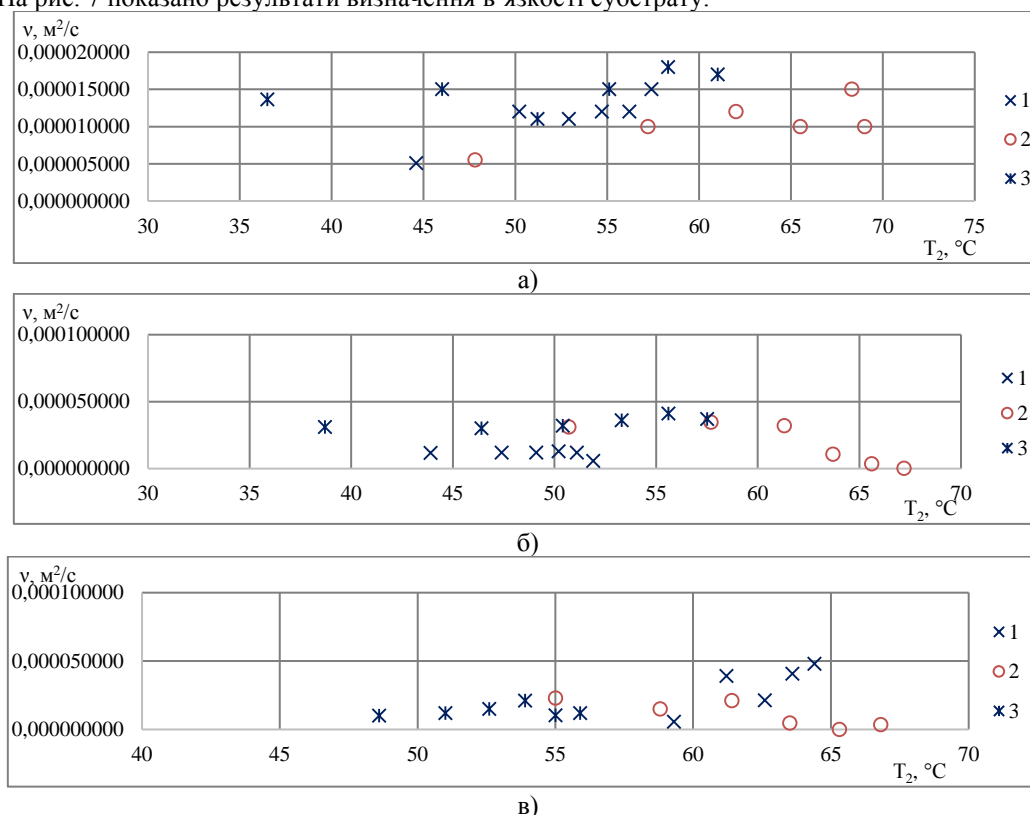


Рисунок 7 – Кінематична в'язкість субстрату в залежності від температури при таких числах обертів пропелерної мішалки – 70 об/хв (а), 100 об/хв (б), 130 об/хв (в): 1) субстрат перед подачею в біореактор; 2) з біореактора; 3) після біореактора.

Після визначення теплофізичних властивостей субстрату з використанням програми *Statistica 6* виводиться критеріальне рівняння (9) для «модельних рідин» разом із субстратом (рис.8), яке описує теплообмін у тонкостінному металевому циліндрі експериментальної установки.

$$\overline{Nu}_2 = 0,023 \cdot Re^{0,683} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (9)$$

яке достовірне в межах  $100 < Re < 12000$ ,  $25 < Pr < 300$ ,

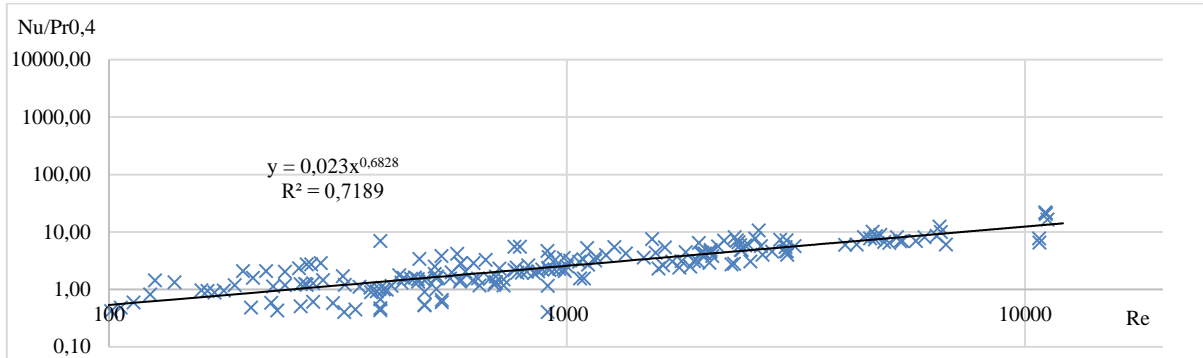


Рисунок 8 – Узагальнення експериментальних результатів

Після проведення реструктуризації критеріальне рівняння теплообміну для «модельних рідин» разом із субстратом на експериментальному стенді (9) приймає вигляд.

$$\bar{\alpha}_2^{PTP} = 0,023 \cdot \bar{w}^{0,683} \cdot l^{-0,317} \cdot KФВ_{(-v)} \cdot \nu^{-0,283} \quad (10)$$

В другому наближенні знаходимо кінематичну в'язкість субстрату перед подачею в біореактор, з біореактора та після біореактора, користуючись отриманим критеріальним рівнянням теплообміну, яке отримано сумісно для «модельних рідин» і субстрату. На рис. 9 показано відношення в'язкості  $\nu_2'$ , знайденої в першому наближенні до в'язкості  $\nu_2''$ , знайденої в другому наближенні.

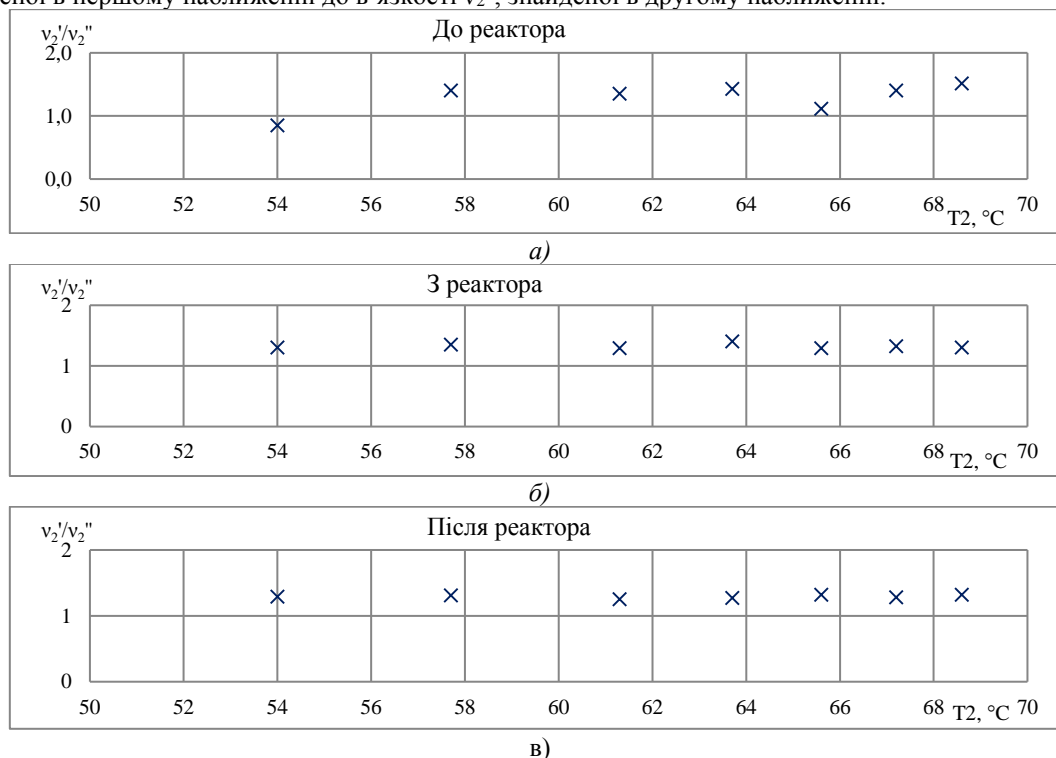


Рисунок 9 – Відношення в'язкості  $\nu_2'$ , знайденої в першому наближенні до в'язкості  $\nu_2''$ , знайденої в другому наближенні: а) субстрат перед подачею в біореактор; б) з біореактора; в) після біореактора.

В роботі визначено в'язкість в першому наближенні з використанням критеріального рівняння для «модельних рідин», та в другому наближенні з використанням критеріального рівняння, одержаного



сумісно для «модельних рідин» і субстрату. З рис. 9 очевидно, що різниця між в'язкістю, знайденої в двох наближеннях, складає до  $\pm 30 \dots 40\%$ .

#### Висновки

1. В роботі вивчається теплообмін багатofазного та багатокomпонентного середовища – субстрату з реальної діючої біогазової установки.

2. Експериментальні результати визначення в'язкості одержані на стенді, який являється складовою експериментально-розрахункового методу. Основними елементами експериментальної установки є дві робочі порожнини – зовнішня та внутрішня.

3. Для опису теплообміну до трифазних середовищ були розроблені критеріальні рівняння в першому і другому наближенні, які складаються з критеріїв подібності, а саме критерія Рейнольдса та критерія Прандтля.

4. Визначено в'язкість в першому наближенні з використанням критеріального рівняння для «модельних рідин», та в другому наближенні з використанням критеріального рівняння, одержаного сумісно для «модельних рідин» і субстрату. Різниця між в'язкістю, знайденої в двох наближеннях, складає до  $\pm 30 \dots 40\%$ .

#### Список використаної літератури

1. Біогазове виробництво «по полицках» - Agrobiogas – Режим доступу: [https://agrobiogas.com.ua/biogas\\_production\\_on\\_the\\_shelves/](https://agrobiogas.com.ua/biogas_production_on_the_shelves/)

2. Біогазові установки: економічна доцільність та перспективи на майбутнє – Режим доступу: <https://agroelita.info/biohazovi-ustanovky-ekonomichna-dotsilnist-ta-perspektyvy-na-maybutnie/>

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

4. Зорг Біогаз – Режим доступу: <https://zorg-biogas.com/biogaz/vygod-biogaza>

5. More HN, Hajare AA. Practical Physical Pharmacy. Career Publications. 2010:141-142.

6. Gaud RS, Gupta GD. Practical Physical Pharmacy. CBS Publisher and Distributors. 2009:56-57.

7. Mohanta GP. Physical Pharmacy Practical Text, Pharma Book Syndicate. 2006: 63-64.

8. Experimental determination of viscosity (viscometer) [Online]. Available: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/experimental-determination-of-viscosity/> Accessed on: February 22, 2023.

9. Погорелов А.І. Тепломасообмін (основні теорії і розрахунки): Навчальний посібник для вузів, 2-ге видання. – Львів: «Новий світ - 2000», 2004. – 144с.

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

11. Ткаченко С., Власенко О., Резидент Н. Теплообмін циліндричного рідинного тіла обмеженої висоти з навколишнім середовищем. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2. С. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

O. Vlasenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8975-0873

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## DETERMINATION OF THE VISCOSITY OF A MULTIPHASE MEDIUM USING THE THEORY OF SIMILARITY AND THE THEORY OF THE REGULAR THERMAL REGIME

*The properties of each liquid can be characterized by a whole complex of various physical quantities: values of density, viscosity, electrical conductivity, heat capacity, surface tension, etc. At the current stage of technological development, the measurement of liquid viscosity is an urgent task in various areas of human life: automotive, oil and gas, aviation, food, medical and a number of other industries. Viscosity (internal friction) is the property of fluid bodies (liquids and gases) to resist the movement of one of their parts relative to another. Viscosity is a non-constant value and changes depending on the temperature of the liquid medium, the presence of impurities in its composition, and the value of the resource. It can be kinematic, dynamic, conditional and specific. However, indicators of kinematic or dynamic viscosity are most often used. The experimental results of viscosity determination were obtained on the stand, which is a component of the experimental and calculation*

*method. The main elements of the experimental setup are two working cavities - external and internal. Criterion equations in the first and second approximation, consisting of similarity criteria, namely the Reynolds criterion and the Prandtl criterion, were developed to describe the heat transfer to three-phase media. Viscosity was determined in the first approximation using the criterion equation for "model liquids", and in the second approximation using the criterion equation obtained jointly for "model liquids" and the substrate. The difference between the viscosity found in the two approximations is up to  $\pm 30...40\%$ . Key words: regular thermal mode, biogas, substrate, biogas installation, thermal stabilization, thermophysical properties, experimental and calculation method, mathematical model.*

**Keywords:** *regular thermal mode, biogas, substrate, biogas installation, thermal stabilization, thermophysical properties, experimental and calculation method, mathematical model.*

#### **References**

1. Biogas production "on the shelves" - Agrobiogas - Access mode: [https://agrobiogas.com.ua/biogas\\_production\\_on\\_the\\_shelves/](https://agrobiogas.com.ua/biogas_production_on_the_shelves/)
2. Biogas plants: economic feasibility and future prospects - Access mode: <https://agroelita.info/biohazovi-ustanovky-ekonomichna-dotsilnist-ta-perspektyvy-na-maybutnie/>
3. Tkachenko S.Y., Pishenina N.V. New methods for determining the intensity of heat exchange in organic waste processing systems: monograph. Vinnytsia: VNTU, 2017. 148p.
4. Zorg Biogas - Access mode: <https://zorg-biogas.com/biogaz/vygod-biogaza>
5. More HN, Hajare AA. PracticalPhysicalPharmacy. CareerPublications. 2010:141-142.
6. Gaud RS, Gupta GD. PracticalPhysicalPharmacy. CBS Publishers andDistributors. 2009:56-57.
7. Mohanta GP. PhysicalPharmacyPracticalText, PharmaBookSyndicate. 2006: 63-64.
8. Experimental determination of viscosity (viscometer) [Online]. Available: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/experimental-determination-of-viscosity/> Accessed on: February 22, 2023.
9. Pogorelov A.I. Heat and mass transfer (basic theory and calculation): Study guide for universities, 2nd edition. - Lviv: "Novyvit - 2000". 2004. – 144 p.
10. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume. Acta Innovations. 2021. No. 42. P. 15-26. doi: 10.32933/ActaInnovations.42.2.
11. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident N. Heat exchange of a cylindrical liquid body of limited height with the environment. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment. 2021. No. 2. P. 27–30. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.05>.

Надійшла: 14.04.2023

Received: 14.04.2023