

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 536.243

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289674

О.В. Власенко¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8975-0873

¹Національний 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, теплоємності, 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 природний (88% вологість); гній свинний самосплавний (95% вологість); гній великої рогатої худобисамосплавний (95% вологість); гній свинний природний (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; рибні відходи; технічний гліцерин; тверді побутові відходи [3-4].



Рисунок 1 – Температурні режими в біореакторі

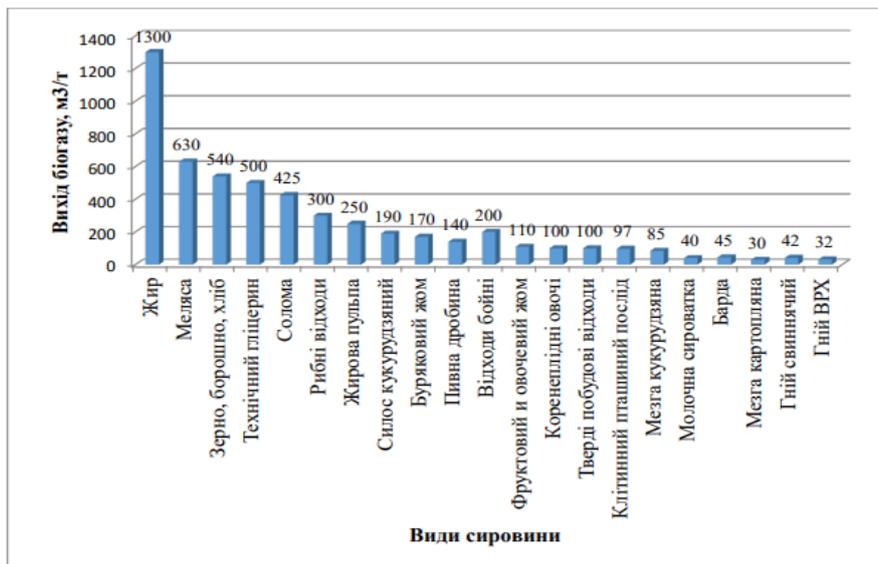


Рисунок 2 – Види сировини, яка застосовується в біогазових технологіях

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 τ , необхідною для зміщення двох пластин, що рухаються одна відносно одної. Чим вище відносна швидкість Δv пластин і чим менша відстань Δu між пластинами, тим більше напруга зсуву. Константа пропорційності між цими величинами є (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 Δs («відстань падіння»). Час Δt , 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 β – 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]:

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

deNu – критерій Нуссельта, характеризує відношення між інтенсивністю тепловіддачі і температурним полем в приграничному шарі потоку;

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

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.

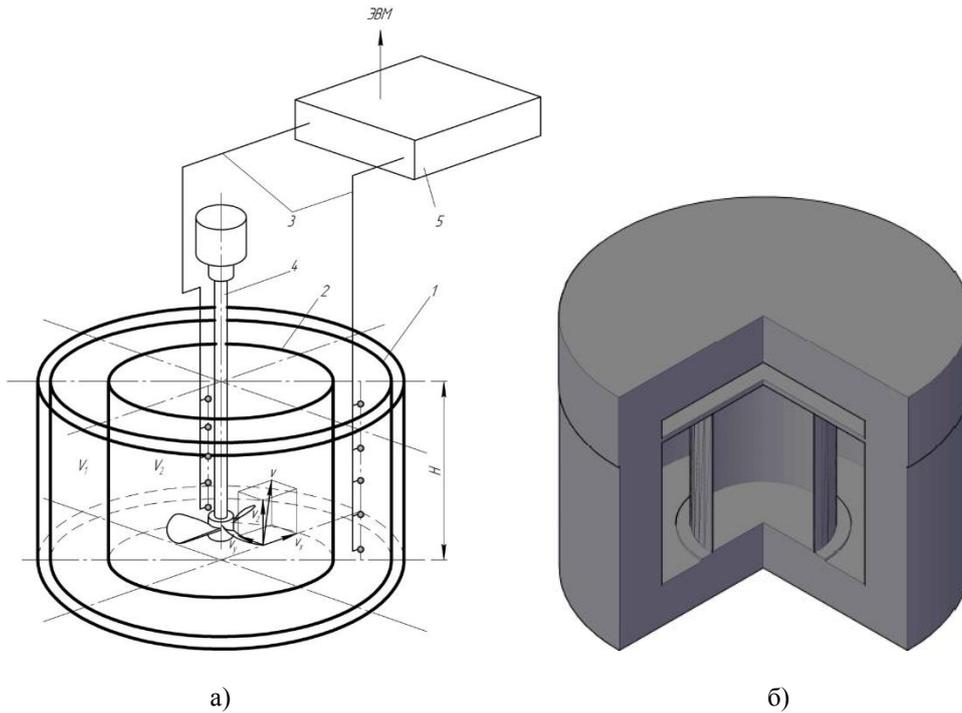


Рисунок 3 – а) схема експериментальної установки 1, 2 – зовнішня та внутрішня посудина; 3 – термопари; 4 – пропелерна мішалка ($d_m=0,08$ м); 5 – пристрій збору і попередньої обробки сигналів, що надходять від датчиків вимірювання температури; б) схема експериментальної установки в 3D зображенні.

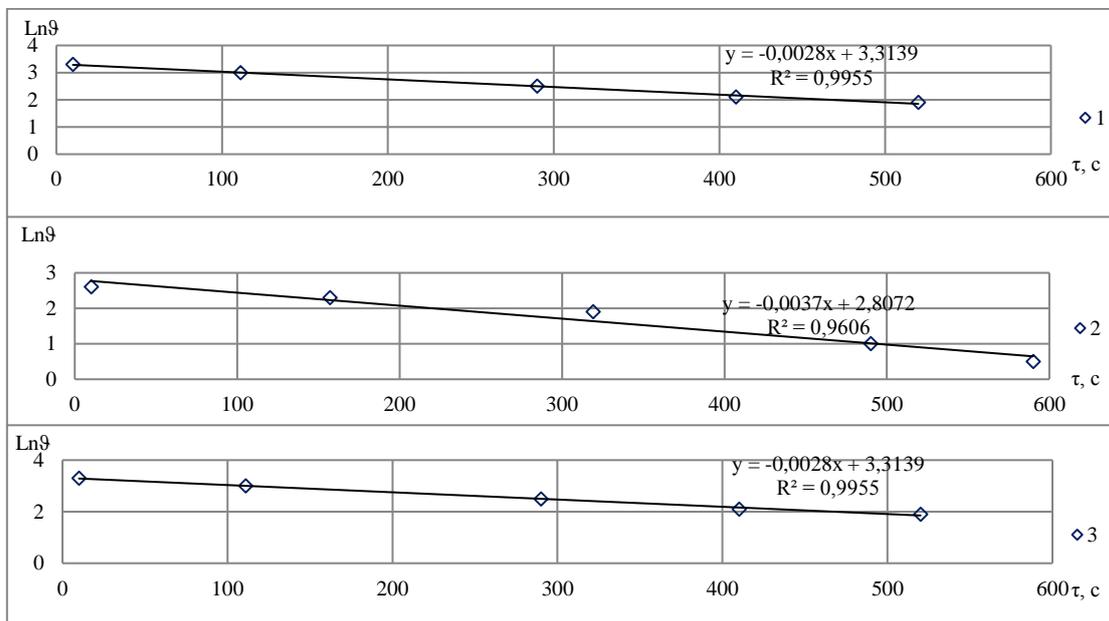


Рисунок 4 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого перед подачею в біореакторі при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; б) 100 об/хв; в) 130 об/хв.

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

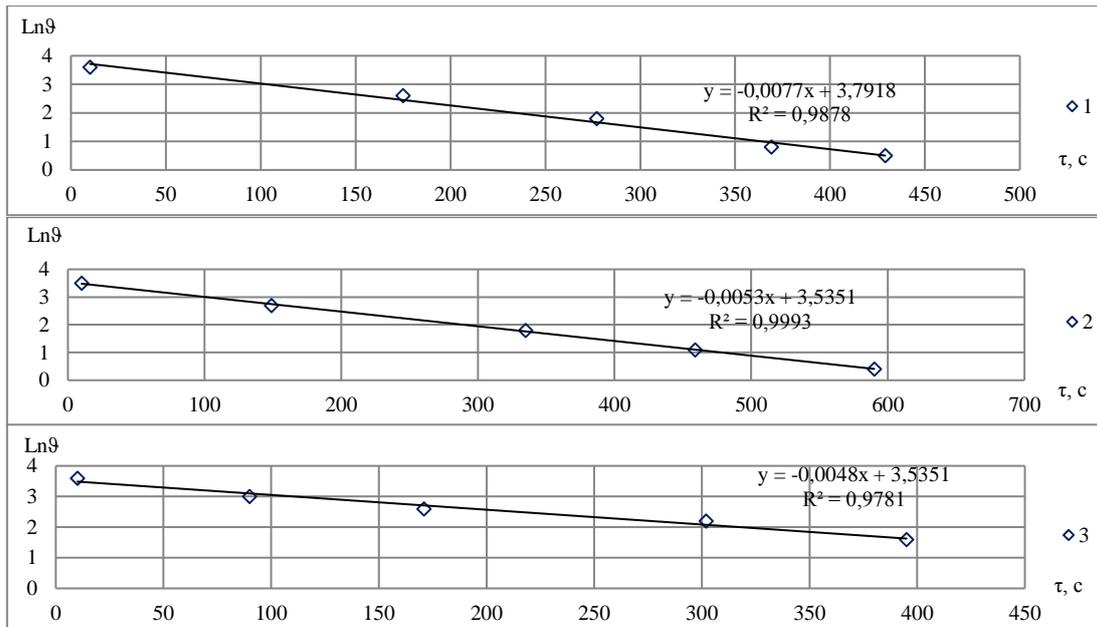


Рисунок 5 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого з біореактора при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; 2) 100 об/хв; 3) 130 об/хв.

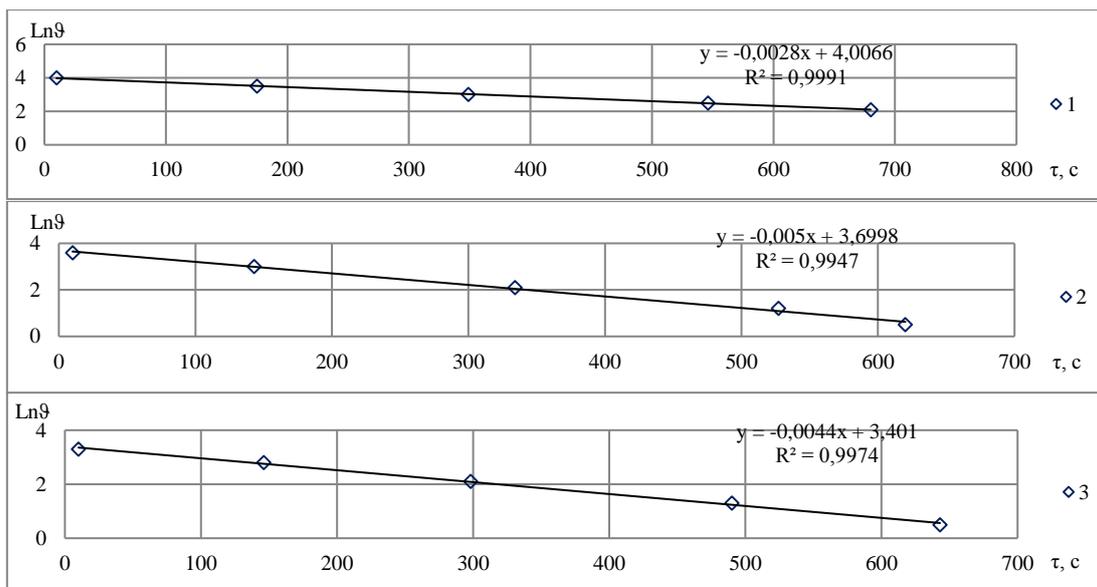


Рисунок 6 – Темп охолодження (нагрівання) під час нагрівання субстрату взятого після біореактора при різних числах обертів пропелерної мішалки на експериментальному стенді: 1) 70 об/хв; 2) 100 об/хв; 3) 130 об/хв.

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

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; ν – кінематична в'язкість досліджуваного рідинного середовища, m^2/s ; a – коефіцієнт температурного розширення, m^2/s ; 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 ρ , коефіцієнт температурного розширення β , питому теплоємність C_p , коефіцієнт теплопровідності λ – 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

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

де $\bar{\alpha}_2^{Prp}$ – коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею тонкостінного металевого 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; $KФВ_{(-v)}$ – комплекс фізичних властивостей без врахування кінематичної в'язкості ν_2 досліджуваного рідинного середовища, $KФВ_{(-v)} = \rho_2^{0,4} \cdot Cr_2^{0,4} \cdot \lambda_2^{0,6}$, β_2 – коефіцієнт температурного розширення, 1/К; ρ_2 – густина, кг/м³; Cr_2 – питома теплоємність, Дж/(кг·К); λ_2 – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов регулярного теплового режиму (PTR)

$$\bar{\alpha}_2^{ptr} = \frac{1}{\frac{1}{k_{експ}} + \frac{F \cdot \psi}{m \cdot C_{p1}}} \quad (8)$$

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 τ_1 і τ_2 , $v = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$, °С; ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температур в тілі; де $K_{експ}$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); F – площа тонкостінного металевого циліндра, м²; C_{p1} – 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.

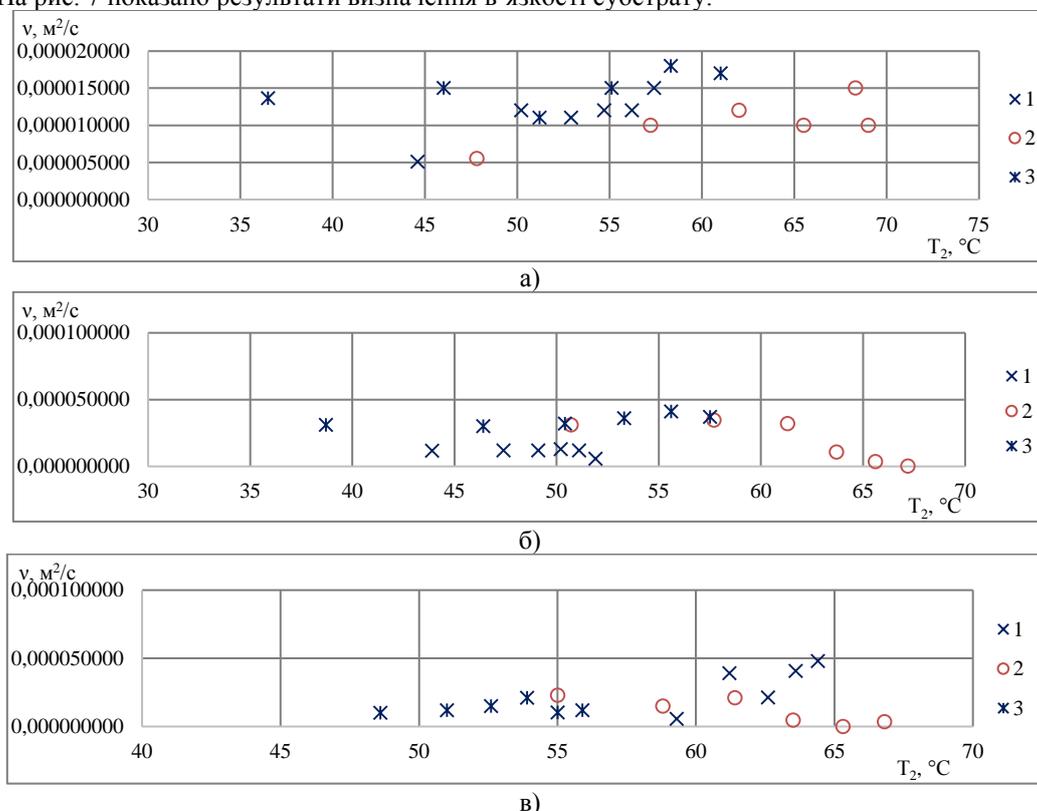


Рисунок 7 – Кінематична в'язкість субстрату в залежності від температури при таких числах обертів пропелерної мішалки – 70 об/хв (а), 100 об/хв (б), 130 об/хв (в):

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 $100 < Re < 12000$, $25 < Pr < 300$,

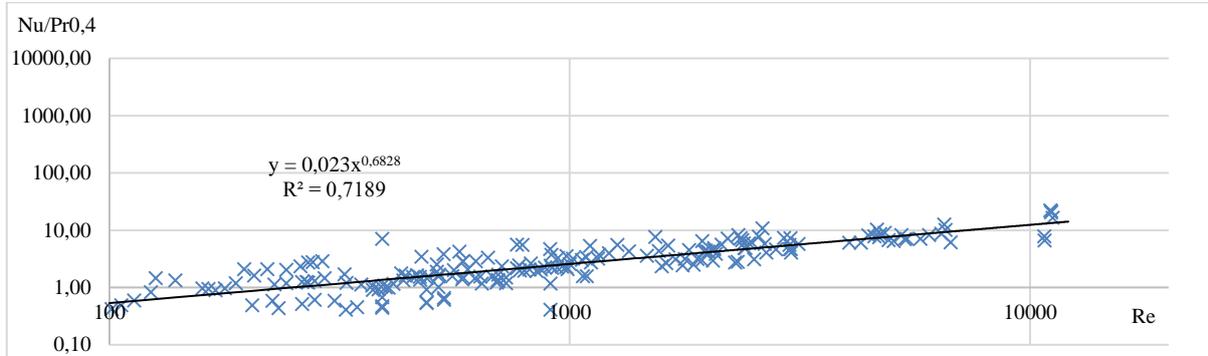


Рисунок 8 – Узагальнення експериментальних результатів

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

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

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 ν_2' , знайденої в першому наближенні до в'язкості ν_2'' , знайденої в другому наближенні.

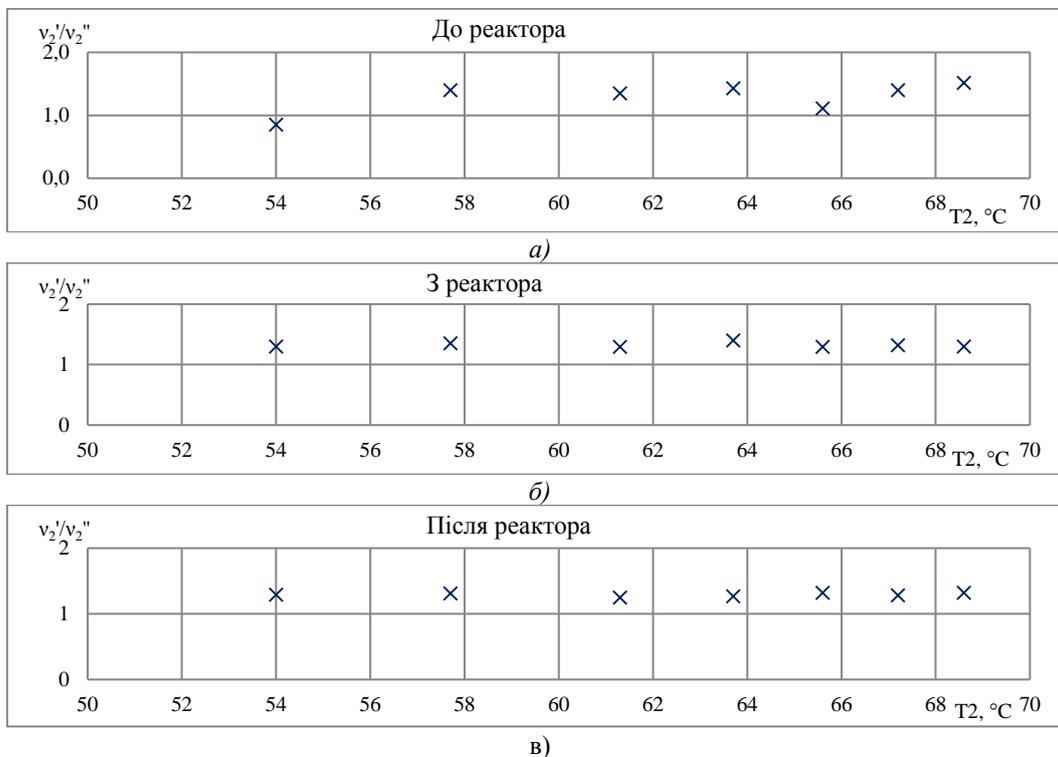


Рисунок 9 – Відношення в'язкості ν_2' , знайденої в першому наближенні до в'язкості ν_2'' , знайденої в другому наближенні:
а) субстрат перед подачею в біореактор; б) з біореактора; в) після біореактора.

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 багатофазного та багатокомпонентного 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/
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. PracticalPhysicalPharmacy. CareerPublications. 2010:141-142.
6. Gaud RS, Gupta GD. PracticalPhysicalPharmacy. CBS Publisher andDistributors. 2009:56-64.
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. Погорелов А.І. Тепломасообмін (основні теорії і розрахунки): Навчальний посібник для вузів, 2-ге видання. – Львів: «Новийсвіт - 2000», 2004. – 144с.
10. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume. ActaInnovations. 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. Vlasenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8975-0873

¹National 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 $\pm 30\text{...}40\%$. 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/
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/vyhod-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

Д.Г. Дерев'яно¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4877-5601С.В. Зайченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8446-5408Н.І. Жукова¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4215-6981В.А. Бобер¹, студент, ORCID 0009-0003-0366-892XВ.О. Шаленко², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6984-0302¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРОБКА І ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СЕЗОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ХОЛОДУ З ФАЗОВИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ

Метою даного дослідження є розробка і обґрунтування параметрів нових конструкцій сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу які дозволяють позбутись деформацій і руйнування контактуючих елементів конструкції акумуляторів при зміні агрегатного стану. В основі конструкції сезонного акумулятора з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу є оболонка, що дозволяє компенсувати розширення матеріалу при зміні агрегатного стану. Встановленні залежності енергетичних параметрів від геометричних параметрів і теплофізичних параметрів складових елементів сезонного акумулятора з фазовим перетворенням, що дозволяють ємність акумулятора і потужності на різних етапах розряду і заряду. Дослідження процесів фазових переходів дозволило встановити характерні етапи заряду і розряду акумулятора: нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення; передача тепла для фазового перетворення 0°C; нагрівання матеріалу після фазового перетворення; охолодження матеріалу до температури фазового перетворення; відведення тепла для фазового перетворення 0°C (в деяких випадках можливо переохолодження до 3-4°C); охолодження матеріалу після фазового перетворення. Найбільші значення потужності акумулятора виникають на етапі охолодження матеріалу до температури фазового перетворення та нагрівання матеріалу після фазового перетворення (25,62КВт). Найнижча потужність акумулятора (13,56КВт) спостерігається нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення та охолодження матеріалу після фазового перетворення, що пояснюється низьким теплообміном акумулюючої речовини у твердому стані. На основі проведених досліджень встановлено рекомендації, що до перспектив розвитку і оптимізації конструкції сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу.

Ключові слова: акумулятор, фазовий перехід, кристалізація, оболонка, охолоджуючий контур

Вступ

Світова практика використання енергоресурсів зосереджена на збільшенні використання нетрадиційних джерел енергії та розвитку енергозберігаючих технологій. Рациональне використання енергоресурсів можливе за рахунок активної політики енергозбереження та створення ефективних систем та енергетичного обладнання[1]. З огляду на підвищені вимоги до мікроклімату в приміщенні, значно зросло енергоспоживання систем опалення і кондиціонування, тому виникає необхідність використання екологічно чистих та енергозберігаючих технологій. Основною світовою тенденцією при створенні систем опалення і кондиціонування є використання теплових насосів які перекачують енергію з зовнішнього середовища і навпаки, часто втрачаючи її. Достатньо високий ефект систем опалення і кондиціонування, що пояснюється збереженням тепла, досягається при створенні теплових акумуляторів, зокрема підземних. Слід відзначити, що частина енергії у випадку геоакумуляторів розсіюється у гірський масив, що суттєво знижує показники енергоефективності. Альтернативою даної технології є акумуляція холоду в системах кондиціонування будівель з використанням відновлюваного сезонного акумулятора холоду з фазовим перетворенням, що є одним із шляхів зменшення споживання енергії та економічно вигідним інженерним рішенням[2-5].

Особливістю рішення що пропонується авторами статті полягає у подвійному використанні теплової енергії що накопичується в акумуляторі з фазовим переходом для систем опалення і кондиціонування в залежності від необхідності, яка викликана сезонним перепадом температур навколишнього середовища.

Огляд джерел

Процесу теплопостачання, на основі сезонних підземних акумуляторів присвячено ряд робіт, що пропонують ряд рішень що до використання приповерхневих ємнісних акумуляторів теплоти[6-8]. В більшості випадків у якості акумулюючого матеріалу пропонується використовувати воду, парафін, жирні кислоти і глауберову сіль. Лідером по теплоємності фазового переходу є глауберова сіль. Основним недоліком гідратів солей є їхнє неконгруентне плавлення. Зазвичай при плавленні утворюються насичена

рідка фаза і тверда у вигляді нижчого гідрату тієї ж солі, яка при цьому осаджується. Крім того, розплавам гідратів солей властиво переохолодження, з подальшою вибуховою кристалізацією[9]. Також до важливих властивостей солей є висока хімічна активність, що суттєво прискорює процес корозії елементів системи.

Парафін і жирні кислоти мають меншу енергію фазового переходу і низьку теплопровідність, що суттєво знижує питомі показники потужності акумуляторі за умов однакової площі теплообмінників. Також спільним недоліком парафінів, жирних кислот і глауберової солі є висока вартість, порівняно з вартістю води.

Загальною проблемою використання матеріалів з фазовим переходом є зміна агрегатного стану, що в першу чергу знижує, або призупиняють процеси масотеплопереносу, а по друге, змінюють питому щільність у твердому стані. Так вода збільшує свій об'єм на 9-10%, що при контакті призводить до еквівалентних деформацій і руйнування контактуючих елементів конструкції акумуляторів, радіатора та стінок корпусу[10, 11].

Враховуючи вище сказане головною причиною малого використання сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням є відсутність конструкції яка могла компенсувати зміну об'єму акумуляуючого матеріалу при зміні агрегатного стану.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка і обґрунтування параметрів нових конструкцій сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням акумуляуючого матеріалу які дозволяють позбутись деформацій і руйнування контактуючих елементів конструкції акумуляторів при зміні агрегатного стану.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка нової конструкції сезонного акумулятора з фазовим перетворенням акумуляуючого матеріалу які дозволяють позбутись деформацій і руйнування контактуючих елементів конструкції акумуляторів при зміні агрегатного стану;
- Встановлення залежностей енергетичних параметрів від геометричних параметрів і теплофізичних параметрів складових елементів сезонного акумулятора з фазовим перетворенням;
- Встановити рекомендації, що до перспектив розвитку і оптимізації конструкції сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням акумуляуючого матеріалу.

Матеріал і результати дослідження

Основним параметром, що дозволяє визначити основні енергетичні процеси від геометричних параметрів і теплофізичних параметрів складових елементів сезонного акумулятора з фазовим перетворенням є потужність акумулятора. Процес зарядження і розрядження акумулятора з фазовим переходом залежить від напрямку і стадії фазового переходу. Назва процесів заряду і розряду акумулятора холоду обернена назвам акумуляторів тепла.

Для вирішення задачі створення нової конструкції сезонного акумулятора холоду запропоновано капсульну конструкцію(рис. 1). Акумулятор складається з резервуару 1 заповненого антифризом 2 на основі етиленгліколю та пропіленгліколю з можливістю зміни рівня. Подача і відведення тепла від системи опалення і кондиціонування відбувається через контур 3. В якості рідини, що акумуляє використано воду яка знаходиться у гумовій капсулі 4. Для стабілізації положення капсула приєднано за допомогою тяги 5 до дна резервуару 6. Резервуар має по всій площі шар теплоізоляції 7.

Процес розряду акумулятора холоду супроводжується підведенням тепла через контур 3 з нагріванням антифризу 2 і капсули 4 зі льодом. Процес нагрівання капсули проходить у декілька етапів(рис. 2, а):

- нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення;
- передача тепла для фазового перетворення 0°C;
- нагрівання матеріалу після фазового перетворення.

Другий етап, що характеризується процесом зміни агрегатного стану проходить поступово з низу у гору розділяючи капсулу умовно на частини з льоду, у верхній частині і води у рідкому стані у нижній частині. Таким чином процеси теплообміну по висоті H капсули проходять з різною швидкістю завдяки різним коефіцієнтам теплопередачі від рідини і льоду до поверхні капсули.

Процес заряду акумулятора холоду супроводжується, навпаки, відведенням тепла через контур 3 з охолодженням антифризу 2 і капсули 4 з водою. Процес охолодження капсули проходить у декілька етапів(рис. 2, б):

- охолодження матеріалу до температури фазового перетворення;
- відведення тепла для фазового перетворення 0°C(в деяких випадках можливо переохолодження до 3-4°C);
- охолодження матеріалу після фазового перетворення.

Як для випадку розряду, так і для випадку заряду процеси охолодження проходять з різною швидкістю в об'ємі капсули. Кристалізація відбувається одночасно по всій периферії поступово

утворюючи шар висотою $\Delta = (D-d)/2$ розділяючи капсулу на частини з льоду, який утворює капсулу з водою діаметром d і висотою h_c .

Для визначення потужності приймемо ряд спрощень розрахункової моделі. Капсулу розглянемо як циліндр у якому температура речовини, що акумулює вирівняна по об'єму. Дане припущення можливо зробити з умови малої швидкості протікання процесів нагріву та охолодження. Також зробимо аналогічне припущення відносно температуру антифризу який оточує капсулу. Маса оболонки капсули, яку планується виготовити з полімеру, що дозволяє розширення води при кристалізації на декілька порядків меншою за масу акумулюючої речовини, що дозволяє знехтувати її впливом.

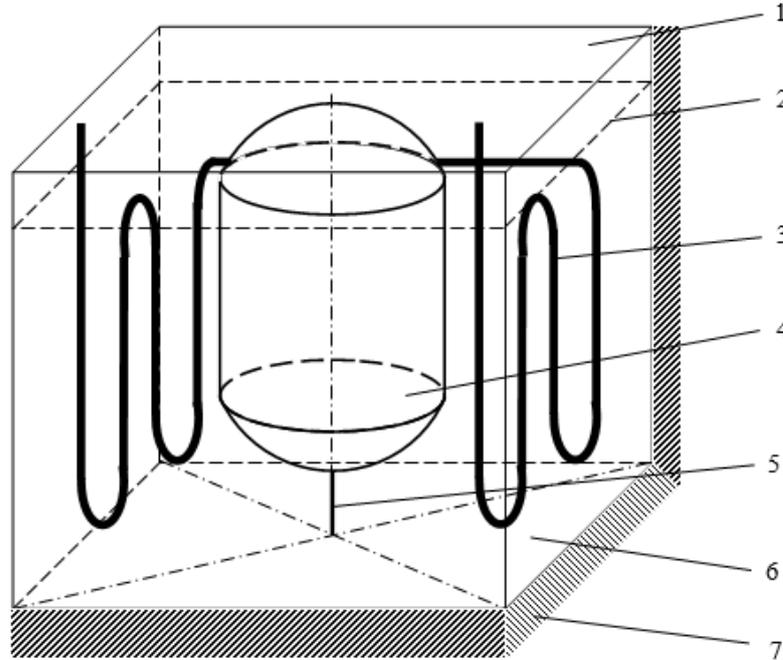


Рис.1 Конструкція сезонного акумулятора холоду

Смність акумулятора відповідно зроблених припущень:

$$Q_c = Q_l + Q_s + Q_f = m(c_l(T_1^c - T_0) + c_s + c_f(T_0 - T_2^c)), \quad (1)$$

Де Q_l - теплота нагріву-охолодження в рідкому стані;

Q_s - теплота нагріву-охолодження фазового переходу;

Q_f - теплота нагріву-охолодження в твердому стані.

m - маса речовини, що акумулює;

c_l c_f - теплоємність води у рідкому і твердому стані;

c_s - теплоємність фазового переходу;

T_1^c і T_2^c - мінімальна та максимальна температура акумулюючої речовини;

T_0 - температура кристалізації.

Так для акумулятора з геометричними параметрами капсули $D = 4\text{ м}$; $H = 4\text{ м}$ кількість енергії, що можливо використати для компенсації навантажень складає $4,63 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 1,11 \cdot 10^{10} \text{ кал}$

Визначимо потужність акумулятора на різних етапах розряду і заряду. Потужність випромінювання або поглинання енергії прямопропорційна повному коефіцієнту теплопередачі системи антифриз-оболочка-акумулююча речовина K , площі поверхні оболонки S і перепаду температури між антифризом та акумулюючою речовиною ΔT :

$$N_c = KS\Delta T. \quad (2)$$

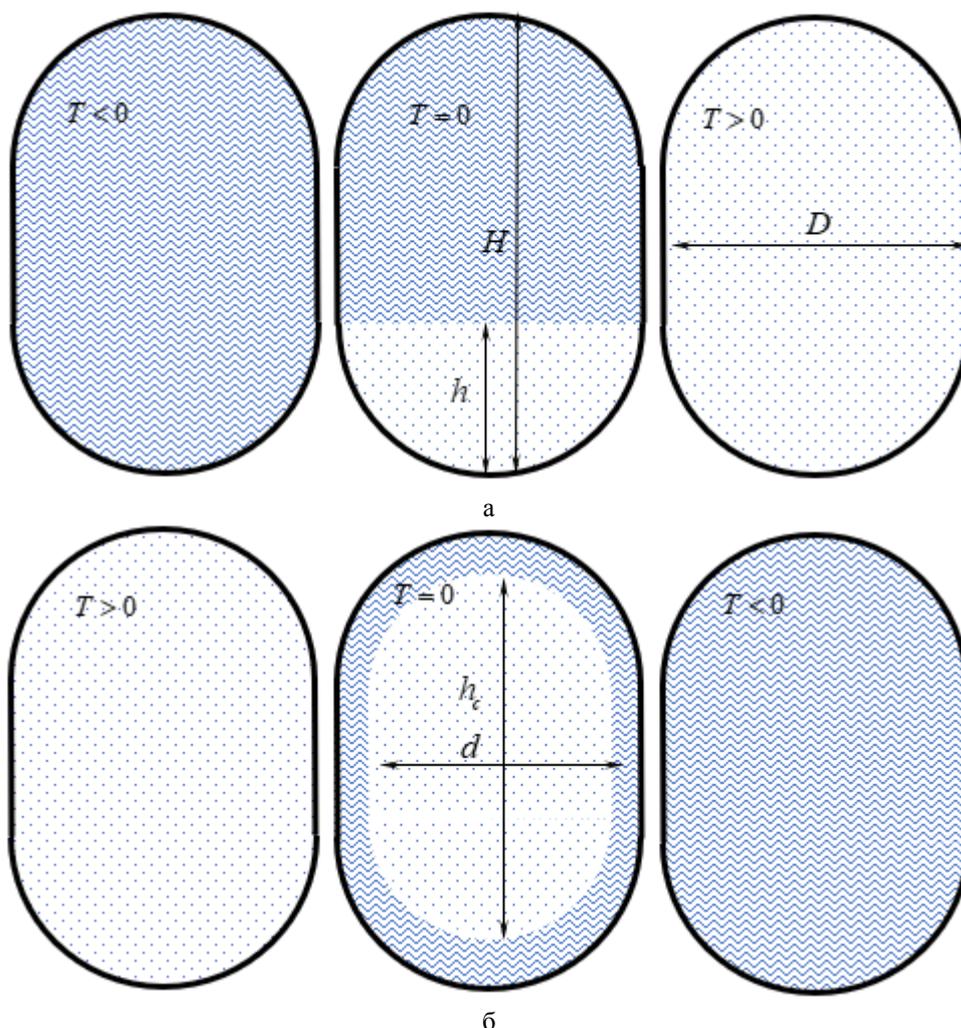


Рис. 2 Схема зміни агрегатного стану матеріалу акумулятора холоду:
а - розряд акумулятора; б - заряд акумулятора

Потужність процесу розряду акумулятора холоду на різних етапах:

- нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення:

$$N_c = K_{11} S \Delta T_1; \quad (3)$$

- передача тепла для фазового перетворення 0°C :

$$N_c = ((D(H-h) + \frac{D^2}{4}) K_{11} + (Dh + \frac{D^2}{4}) K_{12}) \pi \Delta T_2; \quad (4)$$

- нагрівання матеріалу після фазового перетворення:

$$N_c = K_{12} S \Delta T_1. \quad (5)$$

де K_{11} - при твердому стані акумуляуючої речовини;

K_{12} - коефіцієнт теплопередачі системи при рідкому стані акумуляуючої речовини.

Процес заряду акумулятора холоду на різних етапах:

- охолодження матеріалу до температури фазового перетворення:

$$N_c = K_{12} S \Delta T_1; \quad (6)$$

- передача тепла для фазового перетворення 0°C :

$$N_c = K_{13} S \Delta T_1; \quad (7)$$

- охолодження матеріалу після фазового перетворення:

$$N_c = K_{11} S \Delta T_1. \quad (8)$$

де K_{13} - коефіцієнт теплопередачі системи при частковому переході акумуляуючої речовини з рідкого у твердий стан.

Особливістю етапу переходу акумулюючої речовини з рідкого у твердий стан є утворення шару льоду по поверхні оболонки в середині капсули, що суттєво вплине на процес теплопередачі.

Повний коефіцієнт теплопередачі системи для рідкого стану компонентів системи(антифриз, акумулююче середовище) [11]:

$$K_{12} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (9)$$

де α_1 і α_2 - коефіцієнти конвективного теплообміну між акумулюючою речовиною і стінкою оболонки та стінкою оболонки і антифризом (400 і $300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$);

λ – теплопровідність гумової оболонки $0,414 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$;

δ – товщина стінки оболонки($0,01-0,02\text{м}$).

Перетворюючи рівняння (9) повний коефіцієнт теплопередачі системи $18-32 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

Повний коефіцієнт теплопередачі системи для випадку твердого стану акумулюючого середовища:

$$K_{11} = \frac{D/2}{\lambda_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (10)$$

де λ_i - коефіцієнт теплопровідності акумулюючої речовини в твердому стані.

Перетворюючи рівняння (10) повний коефіцієнт теплопередачі системи $2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

Повний коефіцієнт теплопередачі системи для випадку фазового переходу акумулюючого середовища:

$$K_{13} = \frac{(D-d)/2}{\lambda_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (11)$$

На даному етапі заряду акумулятора коефіцієнт теплопередачі може змінюватись у широкому діапазоні від 2 до $32 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

Для візуалізації різниці потенціалу, що реалізується запропонованої конструкції акумулятора побудуємо діаграми значень потужності з певними геометричними параметрами(рис. 3).

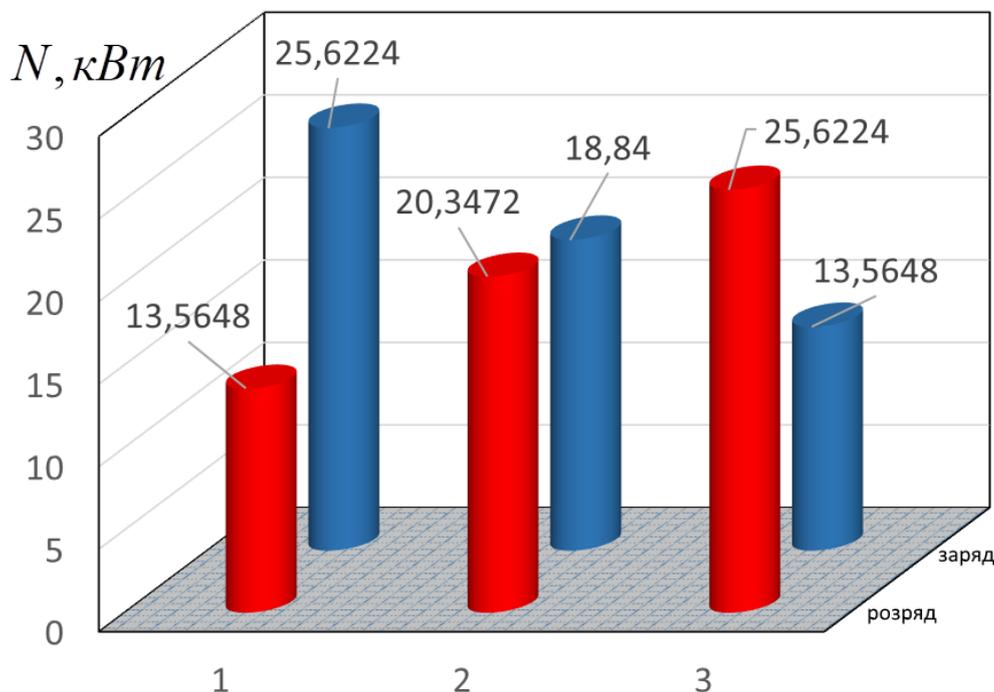


Рис. 3 Діаграми значень потужності акумулятора холоду($D = 4\text{м}; H = 4\text{м}$)

Аналіз отриманих значень свідчить про найбільші значення потужності акумулятора виникають на етапі охолодження матеріалу до температури фазового перетворення та нагрівання матеріалу після фазового перетворення ($25,62\text{кВт}$). Найнижча потужність акумулятора ($13,56\text{кВт}$) спостерігається нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення та охолодження матеріалу після фазового

перетворення, що пояснюються низьким теплообміном акумулюючої речовини у твердому стані. Заходами, що до збільшення потужності акумулятора можуть бути використання ополонок з розвинутою площею контакту за рахунок гофрування поверхні або зміни форми, наприклад торообразної форми.

Висновки

- Розроблено нову конструкцію сезонного акумулятора з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу, що дозволяє компенсувати деформації і руйнування контактуючих елементів конструкції акумуляторів при зміні агрегатного стану. В основі конструкції сезонного акумулятора з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу є оболонка, що дозволяє компенсувати розширення матеріалу при зміні агрегатного стану;

- Встановленні залежності енергетичних параметрів від геометричних параметрів і теплофізичних параметрів складових елементів сезонного акумулятора з фазовим перетворенням, що дозволяють ємність акумулятора і потужності на різних етапах розряду і заряду. Дослідження процесів фазових переходів дозволило встановити характерні етапи заряду і розряду акумулятора: нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення; передача тепла для фазового перетворення 0°C; нагрівання матеріалу після фазового перетворення; охолодження матеріалу до температури фазового перетворення; відведення тепла для фазового перетворення 0°C (в деяких випадках можливо переохолодження до 3-4°C; охолодження матеріалу після фазового перетворення;

- Найбільші значення потужності акумулятора виникають на етапі охолодження матеріалу до температури фазового перетворення та нагрівання матеріалу після фазового перетворення (25,62КВт). Найнижча потужність акумулятора (13,56КВт) спостерігається нагрівання матеріалу до температури фазового перетворення та охолодження матеріалу після фазового перетворення, що пояснюються низьким теплообміном акумулюючої речовини у твердому стані.

- На основі проведених досліджень встановлено рекомендації, що до перспектив розвитку і оптимізації конструкції сезонних акумуляторів з фазовим перетворенням акумулюючого матеріалу.

Список використаної літератури

1. Zaichenko S. et al. Substantiation of diagnostic parameters of autonomous sources of electric energy on the basis of the internal combustion engine at development of system of technical diagnostics //POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. – 2020. – №. 3. – С. 29-34.
2. Klychev S. I. et al. Thermal Losses of a Three-Layer Underground Cylindrical Heat Accumulator of Solar Installations //Applied Solar Energy. – 2021. – Т. 57. – №. 6. – С. 523-527.
3. Kortiš J., Gottwald M. Numerical Simulation of Thermal Energy Storage in Underground Soil Heat Accumulator //Civil and Environmental Engineering. – 2014. – Т. 10. – №. 2. – С. 93-97.
4. Basok B. et al. Three-dimensional numerical model of hydrodynamics and heat transfer in the system" soil-heat exchanger-heat carrier //ACTUAL PROBLEMS OF RENEWABLE ENERGY, CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. – 2021. – С. 45.
5. Горобець В. Г., Антипов Є. О. Застосування сонячних енергетичних установок та акумуляторів теплоти в системах тепло забезпечення теплиць //Техніка та енергетика/Machinery & Energetics. – 2014. – №. 194.
6. Забарний Г. М. и др. Сезоне акумулювання теплоти в підземних акумуляторах:-К //ТОВ «БІОЛ-ПРИНТ. – 2009./ Антипов Є. О. Енергозберігаюча система теплопостачання на базі сезонного акумулятора теплоти //Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – №. 5, Т. 1. – С. 177-184.
7. Антипов Е. А. Исследование процессов тепло-и массопереноса в низкотемпературных аккумуляторах теплоты при фазовых превращениях аккумулирующего материала //Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. – 2015. – №. 15, т. 2. – С. 131-135.
8. Антипов Є. О. Чисельне дослідження процесів теплопереносу в низкотемпературних акумуляторах теплоти при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу //Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – №. 224. – С. 208-213.
9. Kozak K., Zhelykh V. Оцінка та аналіз характеристик теплових акумуляторів для повітряних геліосистем //Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2016. – №. 19. – С. 65-70.
10. Rabczak S. Free-cooling in seasonal cold accumulator //International Journal of New Technology and Research. - 2015. - Т. 1. - №. 8. - С. 49-52.
11. Mehling, H. "Heat and cold storage with PCM" / H. Mehling, L. F. Cabeza. - Springer 2008.
12. Побігійло В.А., Зайченко С.В., Жукова Н.О., Шаленко В.О. Дослідження теплового режиму приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – № 2 (68). – С. 114-118.

D. Derevyanko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

S. Zaichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

N. Jukova¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4215-6981

V. Bober¹, student, ORCID 0009-0003-0366-892X

V. Shalenko², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6984-0302

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Kyiv National University of Construction and Architecture

DEVELOPMENT AND DETERMINATION OF PARAMETERS OF SEASONAL COLD ACCUMULATORS WITH PHASE TRANSFORMATION

The purpose of this study is to develop and justify the parameters of new structures of seasonal batteries with phase transformation of the storage material, which allow to get rid of deformations and destruction of the contacting elements of the battery structure when the aggregate state changes. The design of a seasonal battery with a phase transformation of the storage material is based on a shell that allows to compensate for the expansion of the material when the aggregate state changes. Determination of the dependence of the energy parameters on the geometric parameters and thermophysical parameters of the constituent elements of the seasonal battery with phase transformation, which allow the battery capacity and power at different stages of discharge and charge. The study of phase transition processes made it possible to establish the characteristic stages of charging and discharging the battery: heating the material to the phase transformation temperature; heat transfer for phase transformation 0°C; heating the material after the phase transformation; cooling the material to the phase transformation temperature; heat removal for phase transformation 0°C (in some cases hypothermia up to 3-4°C is possible; cooling of the material after the phase transformation. The largest battery power values occur at the stage of cooling the material to the temperature of the phase transformation and heating the material after the phase transformation (25.62 kW). The lowest power of the battery (13.56 kW) is observed heating of the material to the temperature of the phase transformation and cooling of the material after the phase transformation, which is explained by the low heat exchange of the accumulating substance in the solid state. Based on the conducted research, recommendations were made that the prospects for the development and optimization of the design of seasonal batteries with the phase transformation of the accumulating material.

Key words: battery, phase transition, crystallization, shell, cooling circuit

References

1. Zaichenko S. et al. Substantiation of diagnostic parameters of autonomous sources of electric energy on the basis of the internal combustion engine at development of system of technical diagnostics //POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. – 2020. – №. 3. – S. 29-34.
2. Klychev S. I. et al. Thermal Losses of a Three-Layer Underground Cylindrical Heat Accumulator of Solar Installations //Applied Solar Energy. – 2021. – T. 57. – №. 6. – S. 523-527.
3. Kortiš J., Gottwald M. Numerical Simulation of Thermal Energy Storage in Underground Soil Heat Accumulator //Civil and Environmental Engineering. – 2014. – T. 10. – №. 2. – S. 93-97.
4. Basok B. et al. Three-dimensional numerical model of hydrodynamics and heat transfer in the system" soil-heat exchanger-heat carrier //ACTUAL PROBLEMS OF RENEWABLE ENERGY, CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. – 2021. – S. 45.
5. Horobets V. H., Antypov Ye. O. Zastosuvannia soniachnykh enerhetychnykh ustanovok ta akumulatoriv teploty v systemakh teplo zabezpechennia teploty //Tekhnika ta enerhetyka/Machinery & Energetics. – 2014. – №. 194.
6. Zabarnyi H. M. y dr. Sezone akumulivannia teploty v pidzemnykh akumulatorakh: -K //TOV «VIOL-PRYNT. – 2009./ Antypov Ye. O. Enerhozberihaiucha systema teplopostachannia na bazi sezonnoho akumulatora teploty //Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu. – 2015. – №. 5, T. 1. – S. 177-184.
7. Antypov E. A. Yssledovanye protsessov teplo-y massoperenosa v nyzkotemperaturnykh akumulatorakh teploty pry fazovykh prevrashcheniakh akumuluyuiushcheho materialu //Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2015. – №. 15, t. 2. – S. 131-135.
8. Antypov Ye. O. Chyselne doslidzhennia protsesiv teploperenosa v nyzkotemperaturnykh akumulatorakh teploty pry fazovykh peretvorenniakh akumuluyuiuchoho materialu //Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu biosursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK. – 2015. – №. 224. – S. 208-213.
9. Kozak K., Zhelykh V. Otsinka ta analiz kharakterystyk teplovykh akumulatoriv dlia povitrianykh heliosystem //Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplohazopostachannia. – 2016. – №. 19. – S. 65-70.
10. Rabczak S. Free-cooling in seasonal cold accumulator //International Journal of New Technology and Research. - 2015. - T. 1. - №. 8. - S. 49-52.
11. Mehling, H. "Heat and cold storage with PCM" / H. Mehling, L. F. Cabeza. - Springer 2008.
12. Pobihailo V.A., Zaichenko S.V., Zhukova N.O., Shalenko V.O. Doslidzhennia teplovoho rezhymu pryvodu motor-barabanu strichkovoho konveiera. // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho», 2022. – № 2 (68). – S. 114-118.

Надійшла: 12.04.2023

Received: 12.04.2023

С.В. Бойченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

І.О. Шкільнюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570

А.В. Яковлєва¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7618-7129

С.Ю. Докшина¹, аспірант, ORCID 0000-0001-8136-8779

І.О. Куберський¹, аспірант, ORCID 0000-0002-3800-8484

О.В. Сібілєва², канд. вет. наук, ORCID 0000-0001-5339-7214

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Державна екологічна інспекція України

СИСТЕМАТИЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ДОДАТКІВ ДЛЯ АВІАЦІЙНИХ БЕНЗИНІВ

Додатки у складі бензинів почали використовувати ще у першій половині ХХ ст. Наприкінці 70-х років відбулася якісна концептуальна зміна розвитку цього напрямку науки та практики. Вона була зумовлена забрудненням довкілля шкідливими викидами. Саме екологічні мотиви викликали модифікацію рецептури бензинів і конструкційні удосконалення двигунів. Проблему покращення якості бензинів і палив для повітряно-реактивних двигунів (ПРД) прийнято вирішувати двома способами: розроблення якісних нових продуктів та ефективного використання традиційних.

У запропонованій роботі виконано аналіз наукової літератури стосовно енергоефективних додатків до авіаційних бензинів, та на основі цього створена систематизована інформаційна база, а саме: виконано класифікацію асортименту додатків до бензинів (за наступними ознаками: що підвищують хімічну, фізичну та біологічну стабільність; модифікатори спалахування; модифікатори горіння; миючі; присадки, що сприяють ефективній експлуатації палив за низьких температур; модифікатори тертя; маркуючі; антикорозійні; що підвищують безпеку використання; модифікатори поверхнево-активних властивостей), та асортименту антидетонаційних і екологічних (антиемісійних) додатків у складі авіаційних бензинів.

В Україні виготовляються та допущені до використання: полі-функціональні додатки, що представляють складну суміш сполук мангану та суміші парафінових і нафтенених вуглеводнів (ТУ 30218597.001 «Присадки поліфункціональні «Екооктан». Технічні умови»); залізомісткі базатофункціональні добавки «Стандарт»; також, відомі розробки оксигенатів на основі метанолу, етанолу та інших спиртів, продуктів перероблення спиртів, етерів і інших кисеньовмісних сполук.

Дослідження виконуються у рамках проекту «Розроблення технології виробництва нових екологічно безпечних високооктанових авіаційних бензинів із вітчизняної сировини» за рахунок державного бюджету згідно Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 серпня 2022 р. № 713-р «Про затвердження переліку науково-технічних (експериментальних) розробок в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію у 2022 році» (реєстраційний номер 2020.01/0242).

Ключові слова: авіаційні бензини, якість, енергоефективність, додатки до авіаційних бензинів, присадки до авіаційних бензинів, інформація, база.

Вступ

Додатки у складі бензинів почали використовувати ще у першій половині ХХ ст. Наприкінці 70-х років відбулася якісна концептуальна зміна розвитку цього напрямку науки та практики. Вона була зумовлена забрудненням довкілля шкідливими викидами. Саме екологічні мотиви, як відомо [1–13] викликали модифікацію рецептури бензинів і конструкційні удосконалення двигунів.

Мета та завдання

Метою даної роботи є створення систематизованої інформаційної бази енергоефективних додатків для авіаційних бензинів. **Завдання:** виконати аналіз наукової літератури стосовно енергоефективних додатків до авіаційних бензинів.

Матеріал і результат досліджень

Розвиток паливної галузі взагалі та паливного матеріалознавства авіаційної техніки зокрема тісно пов'язаний із проблемою покращення якості бензинів і палив для повітряно-реактивних двигунів (ПРД) [1, 4–6, 13]. Цю завжди актуальну проблему [13], що постає перманентно перед галуззю, прийнято вирішувати за двома напрямками розроблення якісних нових і ефективного використання традиційних продуктів необхідного та поновлювального асортименту, зокрема:

- спеціальних за складом і будовою речовин і сполук – так званих додатків (присадок) (до 0,5% мас.) та добавок (до 2% мас. і більше), що виявляючи цілеспрямовані функціональні властивості, покращують експлуатаційні показники палив;

- нових, синтетичного або біосинтетичного походження сполук – потенційних палив як компонентів (більше 2% мас.) для створення найсучаснішого типу палив – композиційних, що одержують компаундуванням традиційних (мінеральних або (і) синтетичних) і нових паливних компонентів і відповідних додатків і (або) добавок, або цілий їх пакет.

Визначально важливими питаннями даної проблеми є урахування:

а) енерго- і ресурсозберігаючих аспектів; б) екологічної безпеки для довкілля та людини додатків, добавок і всіх інших можливих компонентів; в) техніко-економічних переваг і доцільності відбирання окремих складників композиційних палив [1–11].

Асортимент додатків і добавок до палив взагалі перевищує тридцять типів.

Найбільш поширеними додатками є антидетонатори, що призначені для покращення процесів згорання палив і корегування їх октанового числа (ОЧ) [4, 9–17].

Відомі два методи запобігання детонації моторного палива:

1) зміна складу палива, що складно та вартісно;

2) підбір додатків, що руйнують вибухонебезпечні продукти горіння.

Серед таких додатків, що одержали назву антидетонатори, найбільшого розповсюдження одержав тетраетил-свинець (ТЕС), що нині заборонений до використання у більшості країн світу через його високу токсичність. На сьогодні відомо три добавки, що розроблені на основі ТЕС: Р-9, П-2 та 1-ТС [2–4].

Бензин, що містить ТЕС, відноситься до 2 класу небезпеки та є отруйним, у першу чергу тому, що сполуки свинцю (Pb^{+2} , Pb^{+4}) є нервовими отрутами та викликають у людей розсіяний склероз.

Заборона ТЕС з екологічної та санітарно-гігієнічної точок зору створила немало проблем. Собівартість бензинів зросла, оскільки будь-який інший спосіб підвищення ОЧ дорожчий, ніж використання ТЕС, а об'єм виробництва альтернативних антидетонаторів нині є недостатнім, внаслідок чого ОЧ неетильованих бензинів більшості європейських країн знизилась до критичного рівня.

На сьогодні розроблення антидетонаторів здійснюється двома напрямками. Перший передбачає пошук нових нетоксичних металомістких антидетонаторів, другий (головний) – модифікація складу бензинів додаванням ароматичних вуглеводнів, безольних антидетонаторів (амінів), алкілатів, кисеньвмісних сполук – оксигенатів (спирти, ефіри), інших високооктанових компонентів. Перевірена антидетонаційна ефективність багатьох металів. Широко досліджувалися сполуки мангану – циклопентадієніл-трилкарбоніл-манган (ЦТМ) та метил-циклопентадієніл-трилкарбоніл-манган (МЦТМ), що за своєю ефективністю навіть перевершували ТЕС. Проте надії на ці сполуки як функціонально ефективні та екологічно безпечні не збулись тому, що, як показала практика їх використання, розчин ЦТМ виявився досить нестабільним, а продукти розпаду МЦТМ виявились отрутою для каталізаторів очищення відпрацьованих газів. Багаточисельні дорожні випробування на сучасних автомобілях показали, що детонаційна стійкість бензинів із МЦТМ в умовах експлуатації більше відповідає ОЧд, ніж за ОЧм (табл. 1).

Ефективність алкоксиметилпохідних ЦТМ залежно від складу алкоксигруп знижується у такому порядку: $CH_3OR > C_2H_5OR > C_3H_7OR > ROCH=CH_2 \gg C_6H_5-CH_2OR$, де $R = MnC_5H_4(CO)_3CH_2$.

Антидетонаційна ефективність ацетил-трифтор-циклопентадієніл-трикарбо-нілмангану (АТФ-ЦТМ) у композиції ізookтану з н-гептаном у середньому перевищує ефективність ЦТМ (ОЧ на 2–3 одиниці). При цьому для однакового приросту ОЧ бензину марки А-72 необхідно додавати АТФ-ЦТМ у два рази менше марганцю, ніж у бензин з ЦТМ. Антидетонаційна ефективність АТФ-ЦТМ під час оцінки його вмісту у грамах металу більше, ніж для ЦТМ.

В Україні виготовляються та допущені до використання полі-функціональні добавки, що представляють складну суміш сполук мангану та суміші парафінових і нафтових вуглеводнів (ТУ 30218597.001 «Присадки поліфункціональні «Екооктан». Технічні умови») [4, 10].

На сьогодні як антидетонатори досліджені також пентакарбоніл заліза, дицикло-пентадієніл-залізо, або фероцен і дізобутиленовий комплекс пентакарбоніла заліза. Серед сполук заліза розповсюджений фероцен, що належить до групи седвінчеподібних елементорганічних сполук перехідних металів.

Фероцен та його похідні одержали допуск до застосування у складі бензинів всіх марок у концентрації, що відповідає вмісту заліза не більше 37 мг/л. Антидетонаційна ефективність фероцену вища, ніж ефективність карбонілу заліза у припустимих концентраціях їх використання. В Україні виготовляються та допущені до використання залізомісткі багатофункціональні добавки «Стандарт» [4, 10].

Фероценові антидетонатори були розроблені та запатентовані в 1952 р. Антидетонатори на основі похідних фероцену порівняно нетоксичні, дешеві та ефективні. Крім того, вони є каталізаторами горіння і запобігають утворюванню сажі й нагарів, знижують у викидних газах вміст оксиду вуглецю, бензпіренів й вуглеводнів і меншою мірою – оксидів азоту. Однак дослідження, здійснені в 1950–1970 рр., не привели до промислового використання фероценів через ті ж причини, що й манганових антидетонаторів. Застосування ефективних концентрацій призводило до відкладення в камері згорання оксидів заліза,

зниження ефективності свічок запалювання, підвищення зношування двигуна, необхідності застосування виносів тощо [4, 9, 10].

Таблиця 1. Ефективність ТЕС та МЦТМ за спільного додавання до різних бензинів [4]

ТЕС, мг/л	МЦТМ, г/л	ОЧд	ОЧм	ДОЧ за л об/хв				
				1500	2000	2500	3000	середнє
Бензин А								
0	0	90,7	73,5	90,1	90,6	90,8	89,9	90,4
0	0,066	94,4	82,4	93,2	93,5	93,8	92,2	93,2
0	0,132	95,7	83,3	94,5	95,0	94,4	93,2	94,3
0	0,264	97,3	83,7	95,5	96,5	95,9	94,9	95,7
0	0,528	99,2	85,0	97,4	98,0	97,6	96,8	97,5
0,792	0	98,0	85,2	96,0	96,8	96,2	95,0	96,0
0,792	0,026	98,8	86,0	94,9	97,6	97,4	96,5	97,0
0,792	0,066	98,9	86,2	99,6	97,6	97,3	96,5	97,0
0,792	0,132	99,4	86,5	97,3	97,7	97,6	96,8	97,3
0,792	0,264	100,0	87,0	97,3	97,9	97,6	96,7	97,4
Бензин Б								
0	0	90,6	83,0	88,3	89,6	89,9	89,7	89,4
0	0,066	94,1	84,6	89,8	92,5	93,7	98,3	92,3
0	0,132	95,7	85,3	92,9	94,2	95,4	94,8	94,3
0	0,264	97,7	86,5	94,8	96,4	97,8	97,0	96,5
0	0,528	99,6	88,2	97,0	98,9	99,4	99,0	98,6
0,792	0	99,0	90,7	97,1	99,1	99,4	99,5	98,8
0,792	0,026	99,3	90,6	96,4	99,0	99,9	99,7	98,8
0,792	0,066	99,5	91,0	97,5	99,9	100,6	100,4	99,6
0,792	0,132	99,7	91,0	96,8	99,4	100,3	99,8	99,1
0,792	0,264	100,8	91,3	97,9	100,0	100,8	99,9	99,7

Одним із варіантів виробництва неестильованих бензинів є використання компонентів на основі кисеньвмісних сполук (оксигенатів) [14–34]. На сьогодні на практиці застосовують спирти (етанол, метанол, ізопропанол, бутанол), їх етери (метил-трет-бутиловий тощо), суміші спиртів з етерами, наприклад метил-трет-бутилового з трет-бутанолом, а також відходи виробництва етанолу. В Україні відомі розробки оксигенатів на основі метанолу, етанолу та інших спиртів, продуктів перероблення спиртів, етерів і інших кисеньвмісних сполук. Використання оксигенатів дозволяє знизити викиди CO_x на 14%, вуглеводнів на 7% та уникнути застосування токсичного бензолу. Етанол як оксигенат належить до відновлювальних джерел енергії, тому його використання як компонента, що підвищує ОЧ бензину, може бути перспективним. Попри усі позитиви використання оксигенатів досвід їх застосування в бензинах виявив низку проблем. По-перше, під час згорання бензину, що містить оксигенати, через наявність у них зв'язаного кисню у 2–4 рази порівняно із згоранням вуглеводневого палива зростають викиди NO_x та альдегідів. Оптимальна кількість зв'язаного кисню у бензині, що забезпечувала б зниження вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах, одночасно не підвищуючи емісію NO_x та альдегідів, має становити ~ 2%. Це означає, що концентрація оксигенатів в бензині обмежується 10–15%. По-друге, застосування 100%-х оксигенатів практично неможливе у бензинових двигунах. Наприклад, збільшення концентрації етанолу у бензині понад 10% призводить до збіднення бензино-повітряної суміші й погіршує експлуатаційні характеристики двигуна. Тому без модернізації двигунів можна використовувати лише бензини з масовою часткою оксигенатів не більше 10%.

Суттєвим недоліком сумішей оксигенатів з бензином є їх фазова нестабільність, спричинена наявністю в оксигенатах води. Через це зростає корозійна активність палива, погіршуються його протизношувальні властивості, виявляється негативна дія на гумові ущільнення, пластмасу та інші експлуатаційні матеріали. Корозійність бензинів, що містять оксигенати на основі етанолу, ще більше зростає через наявність у ньому кислот, в основному оцтової, що утворюється під час ферментації природної цукристої сировини. Корозійна дія оксигенатних палив полягає в утворенні у карбюраторі осадів, що містять солі заліза, та в рецесії сідла викидного клапана й кородуванні бензинових pomp. Отже, з метою забезпечення фазової стійкості бензину, що містить оксигенати, конче потрібно включати до його складу стабілізатори і антикорозійні та протизношувальні добавки, що, безумовно, підвищує собівартість

такого палива. Стабілізатори забезпечують зниження температури помутніння бензинів до мінус 25– мінус 40°C за масової частки води в паливі від 0,15 до 5%. Як протизношувальні та протизадирні добавки до бензинів, що містять оксигенати, рекомендують додавати естери фосфорних кислот, що часто застосовують разом з естерами на основі моно- чи полікарбонічних кислот C₈–C₉₀ та багатоатомних спиртів C₂–C₉₀, амінами чи оксиалкільованими неіоногенними ПАВ, наприклад полігліколями. Поліпшують мастильні властивості бензинів також первинні нерозгалужені спирти. Інгібітори корозії є невід’ємним компонентом палив, що містять оксигенати. Як інгібітори корозії використовують дикарбоні, фосфорні, сульфонові кислоти та їх солі й аміді: шавлеву, себацінову, алкеніляртарну, суміш останньої з сукцинімідами, імідазолінами або амінотріазолами, калійові солі алкеніляртарних й діалкілнафталінсульфонових кислот. Серед товарних інгібіторів корозії такого типу можна назвати Keronur ES 3222, B-15/41, B-2, B2.1. З метою інгібування корозії та запобігання набряканню та руйнуванню еластомерів, зумовлених спиртовмісними паливами, до них рекомендують додавати також нітровані аміді ароматичних кислот. Негативна дія етерних оксигенатів дещо нижча, ніж відповідних спиртів. Проте одержання етерів потребує використання дорогих і дефіцитних C₃–C₅-фракцій нафтопереробки (каталітичного піролізу й крекінгу), складних технологій із застосуванням каталізаторів. Так, собівартість метил-трет-бутилових і інших етерів в 2–5 разів перевершує собівартість бензинових компонентів реформінгу, каталітичного крекінгу, ізомеризатів, н-бутану, толуолу і майже в 1,5 рази такого високооктанового компонента, як алкілат. На сьогодні, розширення масштабів виробництва та застосування оксигенатних бензинів призвело до відчутного негативного впливу на екологію. Це зумовлено розчинністю оксигенатів у воді й їх стійкістю до біологічного розщеплення.

Беззольними атидетонаторами виявлені такі класи органічних сполук, як похідні фенолу й аміни [4, 9, 10, 14]. Додавання до складу бензину в концентрації 13% фенолів і амінів дозволяє підвищити ОЧ на 2–10 пунктів. Похідні фенолу як атидетонатори не набули практичного застосування або через недостатню ефективність, або високу вартість та нестабільність під час зберігання. Лише ароматичні аміни (аніліни, толуїдини, ксилідини) на практиці використовують як атидетонатори.

Відомі такі товарні добавки до бензинів на основі ароматичних амінів: екстралін, АДА, Ферада, ксилідин. Вони поступаються за ефективністю металовмісним атидетонаторам, але в 10–15 разів перевершують оксигенати. На відміну від металоорганічних і металокомплексних атидетонаторів ароматичні аміни не призводять до відкладання осадів на деталях циліндрово-поршневої групи двигуна та свічках запалювання. Перевага таких додатків – їх поліфункційність. Поряд з підвищенням атидетонаційних властивостей вони виявляють також антиокиснювальну та антикорозійну дію. Основним недоліком ароматичних амінів є їх токсичність та відсутність ефективного вивісця [4, 9, 10, 14].

Як добавки, що поліпшують горіння бензину, відомі солі лужних і лужноземельних металів карбонічних і сульфокислот, а також феноляти і комплекси цих металів з електроннодонорними сполуками: поліамінами, азолами, тіазолінами, естерами, амідіми тощо. Розчинність цих речовин у бензині має забезпечуватися відповідною довжиною вуглеводневого радикала. Найпоширенішими є солі алкеніляртарних кислот (M ~ 1000). Вважають, що ці добавки підвищують швидкість поширення полум’я і тим знижують температуру згорання в системі допалювання. Так, додавання до складу бензину 10–20 млн⁻¹ суміші натрійових і стронційових солей алкеніляртарної кислоти знижує температуру згорання на фільтри-уловлювачі з > 300 до < 200°C. Ці добавки також знижують утворення нагарів у двигуні та захищають сідло випускного клапана від рецесії. Іноді застосовують саму алкеніляртарну кислоту в суміші з мийними добавками [14].

Антиемісійними добавками вважають відомі атидетонатори – металоорганічні сполуки або металокомплекси заліза – фероцени та циклопентадієнілі мангану [4, 9, 10, 14]. Антиемісійна ефективність цих сполук підвищується за наявності деяких органічних речовин: естерів, етерів, тетраетоксисиланів тощо. При цьому метали слугують каталізаторами горіння та сприяють бездимному згоранню палива, а органічні добавки є синергістами цієї дії. Спільне використання циклопентадієнілтрикарбоніл мангану та етерів (наприклад, тетрагідрофуран) сприяє зниженню емісії отруйних викидів і запобігає утворенню осадів у камері згорання. Знижують викиди отруйних газів та зменшують витрати бензину також естери, наприклад оцтово-етиловий або етери ортомурашиної кислоти – продукти взаємодії гліоксалу зі спиртами. Досить ефективною виявилася композиція ацетилацетонату заліза (5·10⁻⁶ – 2·10⁻⁴ %) і тетраетоксисилану (0,005–0,02%). За таких концентрацій ці сполуки знижують емісію CO_x на 80%, вуглеводнів – на 73%, NO_x – на 85%, бензпірену – на 15–38%. Поліпшувати горіння палив здатні також вуглеводневі полімери, наприклад поліізобутен. Дія полімерних додатків полягає в наданні паливу характеру ньютонівської рідини під впливом короткотривалої (мілісекунди) температурної експозиції. Особливо це важливо там, де відбувається швидка зміна в часі процесів упорскування, випаровування та горіння. Вважають, що полімер запобігає утворенню крапель палива, більших за 50 і менших за 10 мкм, підвищує тимчасову його в’язкість, впливає на поверхневий натяг і відносну твердість крапель, робить їх одноріднішими, через що забезпечує контрольоване випаровування. Відомо, що краплі, менші за 10 мкм, горять як пара, більші за 40 мкм – дифузійно, від краплі до краплі. Найкраще, коли розмір крапель

становить 10–40 мкм. Тоді паливо більшою мірою згорає до H_2O і CO_2 . Додавання до бензину полібутену (~0,01%) знижує викиди CO_x , NO_x і вуглеводнів, підвищує потужність двигуна на 10% та збільшує пробіг автомобіля на 20%.

На підставі вищенаведеного аналізу було систематизовано асортимент додатків і добавок до бензинів. Результати систематизації наведені у таблиці 2. Отримана таблиця може слугувати класифікацією додатків до бензинів, в основу якої покладено призначення додатку для надання або поліпшення експлуатаційних властивостей бензинів.

Виокремлюючи речовини та сполуки (антидетонаційні та екологічні (антиемісійні)) для авіаційних бензинів серед низки додатків, було згруповано та систематизовано додатки та добавки за принципом експлуатаційного призначення у такий спосіб (табл. 3).

Ці речовини, як правило, додаються та забезпечують необхідний функціональний ефект у частках на мільйон (ppm). (Для довідки – 1 ppm = 0,0001% мас.). До складу авіаційних бензинів можуть додаватись тільки ті добавки, що спеціально дозволені відповідною специфікацією (стандартом). Антидетонаційні додатки та барвники є обов'язковими у складі авіаційних бензинів. Антиоксиданти, антиводокристалізаційні, антистатичні та іншого функціонального призначення додатки є рекомендувальними.

Висновки

У запропонованій роботі виконано аналіз наукової літератури стосовно енергоефективних додатків до авіаційних бензинів, та на основі цього створена систематизована інформаційна база, а саме: виконано класифікацію асортименту додатків до бензинів (за наступними ознаками: що підвищують хімічну, фізичну та біологічну стабільність; модифікатори спалахування; модифікатори горіння; миючі; присадки, що сприяють ефективній експлуатації палив за низьких температур; модифікатори тертя; маркуючі; антикорозійні; що підвищують безпеку використання; модифікатори поверхнево-активних властивостей), та асортименту антидетонаційних і екологічних (антиемісійних) додатків у складі авіаційних бензинів.

В Україні виготовляються та допущені до використання: полі-функціональні додатки, що представляють складну суміш сполук мангану та суміші парафінових і нафтових вуглеводнів (ТУ 30218597.001 «Присадки поліфункціональні «Екооктан». Технічні умови»); залізомісткі багатофункціональні добавки «Стандарт»; також, відомі розробки оксигенатів на основі метанолу, етанолу та інших спиртів, продуктів перероблення спиртів, етерів і інших кисеньвмісних сполук.

Авторами систематизовано асортимент додатків і добавок до бензинів у вигляді, що може слугувати класифікацією додатків до бензинів, в основу якої покладено призначення додатку для надання або поліпшення експлуатаційних властивостей бензинів. Антидетонаційні та екологічні (антиемісійні) додатки згруповано та систематизовано за принципом експлуатаційного призначення у табличній формі.

Таблиця 2. Класифікація та асортимент додатків до бензинів

Тип присадок чи додатків	Концентрація, %	Активний компонент	Принцип дії
Підвищують хімічну, фізичну та біологічну стабільність			
Антиоксиданти	0,005-0,03	Екрановані феноли; N, N – діалкілпарафенілєндіаміни	Інгібірують радикально-ланцюгове окиснення вуглеводнів
Деактиватори металів	0,001-0,01	Біс-саліциліден-алкілен-діаміни	Інгібірують окиснювальну дію міді, заліза та інших металів
Стабілізатори	0,01-0,05	Композиції антиоксидантів, деактиваторів металів, нейтралізуючих агентів та диспергаторів	Запобігають смоло- та осадоутворенню внаслідок окиснення та інших реакцій ущільнення
Знижують випаровування	0,001-0,01	Поліалкіл-силоксани, четвертинні солі амонію та інші поверхнево-активні речовини (ПАР)	Утворюють міцну адсорбційну плівку на поверхні бензину, що запобігає його випаровуванню
Стабілізатори паливних композицій	0,1-0,5	Аліфатичні спирти, ПАР різної будови	Запобігають розшаруванню паливно-спиртових сумішей, підвищують стабільність водопаливних емульсій
Коагулюючі (Коагулянти)	0,01-0,1	ПАР	Прискорюють коагуляцію забруднень. Потребують наступного відстоювання та фільтрування
Біоциди	0,0001-0,005	Целозольви. Сполуки нікелю, міді, інших металів, гетероциклічні сполуки	Запобігають біокорозії паливних баків та забрудненню палив продуктами життєдіяльності організмів

Таблиця 2. (Продовження)

Тип присадок чи додатків	Концентрація, %	Активний компонент	Принцип дії
Модифікатори спалахування			
Антидетонатори	0,01-0,1	Металоорганічні сполуки свинцю, заліза та мангану; 1-2 N-метиланілін	Запобігають передчасному спалахуванню бензину у двигунах з примусовим спалахуванням
«Витискувачі» металів (спільно з антидетонаторами)	0,01-0,05	Галогеновуглеводні. Сполуки фосфору та бору.	Запобігають відкладенню металів на свічках та інших деталях двигуна через утворення летких сполук
Модифікатори горіння			
Антинагарні	0,05-0,01	Термостійкі ПАР у поєднанні з модифікаторами нагару (оксигенати)	Видаляють нагар з камери згорання, запобігають закоксуванню поршневих кілець
Антидимні	0,05-0,2	Теплорозчинні сполуки барію, заліза та інших металів	Прискорюють вигорання сажі на останніх стадіях процесу горіння
Ініціатори горіння (промоутери)	0,001-0,01	ПАР з добавками каталізаторів горіння – сполук металів	Інтенсифікують (прискорюють) процес горіння палива
Каталізатори горіння	0,1-0,2	Сполуки заліза, нікелю та інших металів, які легко йонізуються, з добавками ПАР	Полегшують сумішоутворення та прискорюють горіння залишкових палив
Миючі			
Очищувачі карбюратора	0,005-0,05	Аміно-аміди	Видаляють забруднення із поверхні заслінки карбюратора
Очищувачі впускної системи	0,05-0,1	Полібутенаміни, поліефіраміни	Запобігають відкладенням на поверхні впускних клапанів з безпосереднім вприскуванням бензину
Очищувачі камери згорання	0,05-0,1	Основи Манніха алкілфеноли, сукциніміди	Запобігають утворенню нагару у камері згорання, знижуючи показникові вимоги до октанового числа
Присадки, що сприяють ефективній експлуатації палив за низьких температур			
Антиводо-кристалізаційні	0,01-0,05	ПАР різного складу, компоненти миючих присадок	Запобігають обмерзанню паливної апаратури, утворюючи на поверхні захисну плівку
Модифікатори тертя			
Протизносні	0,01-0,1	Карбонові кислоти, зокрема ВЖК	Утворюють на поверхні тертя плівку, що захищає від зносу
Антифрикційні	0,01-0,5	Сполуки молібдену, ПАР	Підвищують механічний ККД двигуна через зниження втрати на тертя
Маркуючі			
Барвники	0,0005-0,001	Паливорозчинні пігменти типу фталоціанінів, азосполук, похідних антрахінону	Свідчать про наявність у бензині свинцю або підвищеному вмісті сульфуру у дизельних паливах
Антикорозійні			
Антиржавні	0,005-0,05	Похідні алкенилентарного ангідриду, деякі ПАР	Зменшують електрохімічну корозію металів на межі розділу фаз системи «паливо-повітря»
Що підвищують безпеку використання			
Антистатичні	0,00005-0,0005	Композиції ПАР з солями металів (хрому)	Знижують пожежну безпеку під час роботи з паливом через зменшення статичної електрики
Модифікатори поверхнево-активних властивостей			
Антипінні	0,0001-0,001	Полісілоксани та деякі ПАР	Зменшують спінювання палива під час завантаження, транспортування

Таблиця 3. Класифікація та асортимент антидетонаційних і екологічних (антиемісійних) додатків у складі авіаційних бензинів

Найменування (марка) / виробник	Компонентний склад/ активний компонент	Концентрація	Сфера застосування	Основні фізико-хімічні характеристики
На основі сполук свинцю: Тетраетилсвинць (ТЕС), тетраметилсвинць (ТМС), триметилетилсвинць (ТМЕС), діетилдіметилсвинць (ДЕДМС), метилтриетилсвинць (МТЕС) / Innospec Inc. (США), BASF, (Німеччина), Exxon Mobil Corporation (США), Tianjin Zhongxin Chemtech Co., Ltd (Китай)	свинць	0,01–0,1 % (0,17 г Рb/л)	Відомий з 1921 р. («General motors research corporation») Для попередження вибухового розкладу продуктів передполум'яного окиснення палива перед згоранням паливно-повітряної суміші (ППС). Підвищує ОЧ.	Дуже високотоксична та канцерогенна речовина. Разом з ТЕС рекомендовано додавати виносник – етилендибромід і барвник. Етилендибромід діє як поглинач свинцю. Під час згорання бензину, свинць у ТЕС перетворюється на оксид свинцю, що накопичується на клапанах і свічках запалювання. Згодом це може пошкодити двигун. А етилендибромід реагує з оксидом свинцю, утворюючи та перетворюючи його на суміш броміду свинцю та оксидбромідів свинцю. Так як ці сполуки є легкими, вони виходять із двигуна разом із рештою продуктів згорання, що захищає двигун. За додавання цих антидетонаторів в еталонну суміш з 70% ізооктану та 30% н-гептану у кількості 2,0, 1,6 та 1,7 мг/кг відповідно приріст ОЧ суміші, визначеного за моторним методом, становить не менше 17 од.
На основі сполук ароматичних амінів: Екстралін, ксилідин (суміш 7% аніліну, 88% метиланіліну та 5% ксилідину), технічний N-метиланілін (ММА) / Royal Dutch Shell (Велика Британія + Нідерланди), Tianjin Zhongxin Chemtech Co., Ltd (Китай), Zhengzhou Alpha Chemical Co., Ltd. (Китай)	N-метиланілін (C ₆ H ₅ NH), 4-метоксі-N-метиланілін (C ₈ H ₁₁ NO)	1,0–2,0 %	Відомі з 1919 р. (США). Додавалися 4% до складу авіабензинів для підвищення сортності. Модифікатор (промоутер) спалахування. Підвищують ОЧ. Добре сумісні з іншими антидетонаторами. Провокують синергічний ефект. Можуть бути базою для композиційних антидетонаційних додатків.	Менш токсичні аніж ТЕС. За додавання в еталонну суміш, що складається з 70% ізооктану та 30% н-гептану, 1,5% ММА ОЧ суміші збільшується на 6–10 од. ММА осідає у повітрі на висоті 60 см від землі і довго не розпадається. Симптоми отруєння людини: реакції стають загальмованими, людина задихається, вуха та кінчики пальців синіють.
На основі сполук мангану: НІТЕС-3000, 3046, 3062, 3973 / Ethyl Corporation, Afton Chemical corporation (США), Octaburn™8000 Innospec Inc. (США)	Манган (Mn), циклопентадієніл-трикарбоніл-манган (ЦТМ, C ₅ H ₅ Mn(CO) ₃), та метил-циклопентадієніл-трикарбоніл-манган (МЦТМ, (CH ₃ C ₅ H ₄ Mn(CO) ₃)), ацетил-трифтор-циклопентадієніл-трикарбонілманган (АТФЦТМ, CF ₃ COC ₅ H ₄ (CO) ₃ Mn)	До 18 мг/літр (50 мг Mn/л)	Відомі з 1954 р. (Фішером було синтезовано ЦТМ, Німеччина). В Україні допущені до застосування поліфункціональні присадки, що є сумішшю сполук мангану та суміші парафінових і нафтових вуглеводнів (ТУ 30218597.001 «Присадки поліфункціональні „Екооктан”. Технічні умови»).	Менш токсичні аніж ТЕС і ММА. За додавання до 2 мл МЦТМ в 1 кг еталонної суміші з 60% ізооктану та 40% н-гептану підвищує ОЧ на 7-9 од. Проте розчин ЦТМ у бензині виявився дуже нестабільним, погіршується антиокиснювальна стабільність, а продукти розкладання МЦТМ отруювали каталізatori допалу відпрацьованих газів. Фотолітична дія перетворює органічну сполуку на суміш нешкідливих оксидів марганцю, карбонатів і органіки похідної метилциклопентадієну. Первинні властивості втрачаються. Утворюється осад, засмічуються свічки запалювання, підвищується зношуваність деталей двигуна.

Таблиця 3. (Продовження)

Найменування (марка) / виробник	Компонентний склад/ активний компонент	Концентрація	Сфера застосування	Основні фізико-хімічні характеристики
На основі сполук заліза (фероцену): PLUTOcen® F, PLUTOcen® GS 2300i Innospec Inc. (США)	Пентакарбоніл заліза – Fe(CO) ₅ , Фероцен – (C ₁₀ H ₁₀ Fe)	30–45 мг/кг (38 мг Fe/л)	Антидетонаційна ефективність пентакарбонілу заліза Fe(CO) ₅ була виявлена ще в 1924 р. Застосовувався як антидетонатор у 30-ті роки минулого століття у Німеччині у концентрації 2–2,5 мл/кг. Фероценові антидетонатори були розроблені та запатентовані в 1952 р. В Україні виготовляються та допущені до застосування поліфункціональні добавки на основі сполук заліза «Стандарт» (ТУУ 30958302.001 «Добавка багатфункціональна „Стандарт“. Технічні умови»).	Світло-жовта рідина з характерним запахом. Порівняно з попередніми антидетонаторами нетоксична, дешева та ефективна. Каталізатор (промоутер) горіння, запобігає утворенню сажі й нагарів, знижує у викидних газах вміст оксиду вуглецю, бензпіренів й вуглеводнів і меншою мірою – оксидів азоту. Однак дослідження, здійснені в 1950–1970 рр., показали, застосування ефективних концентрацій призводить до відкладення в камері згорання оксидів заліза, зниження ефективності свічок запалювання, підвищення зношування деталей двигуна, необхідності застосування виносів тощо. Пентакарбоніл заліза схильний до швидкого розкладання під дією світла до нерозчинного нонкарбонілу заліза Fe(CO) ₉ . Фероцен – тверда кристалічна речовина помаранчевого кольору. Найбільш високу антидетонаційну ефективність фероцен виявляє в бензинах, що містять до 40% ароматичних вуглеводнів, а також у бензинах, що містять спирти та МТБЕ. Відомий також дізобутиленовий комплекс пентакарбонілу заліза ([Fe(CO) ₅] ₃ [C ₈ H ₁₆] ₃ (співвідношення пентакарбонілу та дізобутилену – 3:5). Мас аналогічні недоліки як і пентакарбоніл заліза. Як і для манганових добавок не винайдено ефективного виносця.
Кисеньвмісні добавки (оксигенати)	Спирти (метанол – CH ₃ OH етанол – C ₂ H ₅ OH, ізопропанол – CH ₃ CH(OH)CH ₃ , бутанол – C ₄ H ₉ OH), їх етери (метил-трет-бутиловий (МТБЕ) – CH ₃ OC ₄ H ₉ , етил-трет-бутиловий (ЕТБЕ) – C ₂ H ₅ -OC(CH ₃) ₃ , метил-трет-аміловий (МТАЕ) – CH ₃ -OC(CH ₃) ₂ C ₂ H ₅ , діізопропіловий (ДІПЕ) – C ₆ H ₁₄ O тощо)	До 15%	Етанол як моторне паливо для ДВЗ використовували ще в 1876 році. Привабливість оксигенатів полягає у тому, що вони вважаються відновлювальними джерелами енергії. Найбільш ефективним (економічним) джерелом отримання спиртів є природний газ. Масове використання бензинів, що містять 5–10% етанолу (газохол), 15% етанолу (Е15) та 22% етанолу бере початок з 1980 рр., коли у Бразилії, США, Швеції, Голландії, Франції, Канаді та Колумбії автомобілі стали заправляти цим видом палива (після світової енергетичної кризи). З 2000 р. В Україні діє ТУ У 30183376.001-2000	Порівняно з попередніми антидетонаторами найбільш безпечні з точки зору токсичності та пожежовибухонебезпеки. Забезпечують підвищення детонаційної стійкості, зниження викидів CO ₂ та незгорілого вуглецю в довкілля. Механізм дії оксигенатів являє собою ступінчасте окислення – це холодне свічення, яке хвилеподібно поширюється по всій газовій реакційній суміші. Використання оксигенатів дозволяє знизити викиди CO ₂ на 14%, вуглеводнів на 7% та уникнути застосування токсичного бензолу. Додані в процес окиснення, сприяють збільшенню повноти згорання та ОЧ бензину, але через нижчу теплоту згорання вміст кисню не повинен перевищувати 2,7% (об.). З екологічної точки зору МТАЕ має більш високий поріг запаху (194 мкг/л проти 95 мкг/л для МТБЕ), а головне не накопичується в водних джерелах через крашу біорозчеплюваність..

Таблиця 3. (Продовження)

Найменування (марка) / виробник	Компонентний склад/ активний компонент	Концентрація	Сфера застосування	Основні фізико-хімічні характеристики
			«Високоокта-нова кисневмісна добавка до бензинів (ВКД). Технічні умови», ГСТУ 320.00149943.015-2000 «Бензини моторні сумішеві. Технічні умови» на виробництво неетильованих бензинів марок А-80Ек, А-92Ек, А-95Ек, А98Ек, що містять до 6% оксигенату. Для стабілізації сумішевих бензинів, у складі яких присутні оксигенати в Україні розроблено добавку «Мегаоктан» (ТУУ 24.1-32589031 «Добавки. Технічні умови»). З 2011 р. діє ДСТУ 7166:2010 «Біоетанол. Технічні умови».	Додавання бінарних додатків на основі МТБЕ та неароматичних амінів призводить до зростання утворення смол і осадів. Однією з найбільш серйозних проблем, що ускладнюють застосування оксигенатів є низька стабільність бензино-спиртових (розшарування) сумішей та особлива чутливість їх до води

Список використаних літературних джерел

1. Бойченко С. В. Рациональное использование углеводневых топлив / С. В. Бойченко. – К.: НАУ, 2001. – 216 с.
2. Бойченко С. В., Иванов С. В., Бурака В. Г. Моторні палива і масла для сучасної техніки: Монографія. — К.: НАУ, 2005. — 216 с.
3. Бойченко С. В. Вступ до хімотології палив та олив: навч. посіб. / С. В. Бойченко, В. Г. Спіркін. — Одеса: Астропринт, 2009. — Ч. 1. — 236 с.
4. Бойченко С. В. Вступ до хімотології палив та олив: навч. посіб. / С. В. Бойченко, В. Г. Спіркін. — Одеса: Астропринт, 2009. — Ч. 2. — 276 с.
5. Boichenko S.V. Aviation Fuels and Lubricants: Manual / S. V. Boichenko, M. M. Zakharchuk. – K.: NAU, 2012. – 184 p.
6. Моторні палива: властивості та якість : підручник / С. Бойченко, А. Пушак, П. Топільницький, К. Лейда; за ред. проф. С. Бойченко. – Київ: Центр учб. літ., 2017. – 323 с.
7. V. Boichenko, A. V. Yakovlieva, O. O. Vovk, M. M. Radomska, L. M. Cherniak, I. O. Shkilniuk. Fundamentals of Chemmotology. – K.: National Aviation University, 2019, 296 p.
8. Boichenko S., Yakovlieva A., Lejda K., Kurdel P. Modern Road Transport's Operational materials. Technical University of Košice, 2020. 279 p, ISBN: 978-80-553-3646-64.
9. Vision 2050: A pathway for the evolution of the refining industry and liquid fuels. *FuelsEurope*. веб-сайт. URL: <https://www.fuelsurope.eu/publications/publications/vision-2050-a-pathway-for-the-evolution-of-the-refining-industry-and-liquid-fuels> (дата звернення: 28.03.2023)
10. Б.М. Ярмолюк, Н.П. Короткова, Л.І. Береза. Тенденції застосування додатків до бензинів // Катализ и нефтехимия. – 2006. – №14. – С. 53–70.
11. Mayur Jadhav, Swati Jadhav and Supriya Chavan. Application of additives with gasoline fuel: A review // 3S Web Conf. 6th International Conference on Energy and City of the Future (EVF'2019). Volume 170, 2020. 6 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017001026>.
12. Бойченко С. В. Перспективи заміни етилової рідини аліфатичними спиртами в складі авіаційних бензинів: вплив на екологічну чистоту / С.В. Бойченко, М.А. Посипайко, О.Г. Личманенко // Наукоємні технології. – 2016. – № 1(29). – С. 107–115.
13. Антидетонаційні властивості авіаційних бензинів і способи їх забезпечення / С. В. Бойченко, О. Г. Кондакова // Вісник Національного транспортного університету. - 2016. - № 2. - С. 21-27.
14. Азаренкова А. О. Перспективи та недоліки використання біоетанольної добавки до палив моторних сумішевих / Аксёнов О. Ф., Бойченко С. В., Азаренкова А. О. // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2014. – Випуск 30. – С. 3–8.
15. Kondakova O., Boichenko S. (2018) Environmentally Clean Reformulated Aviation Gasoline. In: Karakoç T., Colpan C., Şöhret Y. (eds) *Advances in Sustainable Aviation*. Springer, Cham. Kondakova, O., & Boichenko, S. (2017). Environmentally clean reformulated aviation gasoline. *Advances in sustainable aviation* (pp. 3–14) doi:10.1007/978-3-319-67134-5_1
16. Boychenko, S.V., Boychenko, M.S., Lychmanenko, O.G. Effect of additives on properties of aliphatic alcohols gasoline: Analytical review (2015) *Science-Intensive Technologies*, 1 (25), pp. 86–92.

17. Boychenko, S. Causal analysis of aviation gasoline modification (2015) Proceedings of the National Transport University, 2 (32), pp. 3-13. In S.V. Boychenko, O.G. Lychmanenko (Eds.). Series "Engineering". Scientific and technical collection 3
18. Бойченко С. В. Дослідження впливу кавітаційної обробки на октанове число автомобільного бензину / С. В. Бойченко, В. Г. Ланецький, Л. М. Черняк, М. М. Радомська, О. Г. Кондакова // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 2. – С. 107–114.
19. Вплив добавок аліфатичних спиртів на властивості бензинів: аналітичний огляд / С. В. Бойченко, М. С. Бойченко, О. Г. Личманенко, С. М. Кабан // Наукоємні технології. – 2015. – № 1. – С. 86–92.
20. Способи перетворення n-алканів у високооктанові компоненти для моторних палив : [колект.] монографія / О. Б. Целішев, М. Г. Лорія, С. О. Кудрявцев, С. В. Бойченко; ред.: О. Б. Целішев; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – Северодонецьк : СХУ ім. В. Даля, 2020. – 194 с. – Бібліогр.: с. 189–194.
21. Alcohols and Ethers, A Technical Assessment of Their Application as Fuels and Fuel Components, API Publication 4261, 3rd ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2001.
22. W. C. Healy, Jr., C. W. Maassen, and R. T. Peterson, A New Approach to Blending Octanes, paper presented at 24th Mid-year Meeting of the American Petroleum Institute's Division of Refining, New York, May 27, 1959/
23. Austin, Wes; Stanley, David; and Thom, Melanie, "Testing the Effects of a Bio-Derived Alternative Aviation Gasoline on Aircraft Materials In Comparison to 100 Low Lead Aviation Gasoline" (2013). Aviation Technology Graduate Student Publications. Paper 29.<http://docs.lib.purdue.edu/atgrads/29>.
24. Federal Aviation Administration (2006). Spark Ignition Aircraft Engine Endurance Test of Aviation-Grade Ethanol 85. (FAA Technical Report No. DOT/FAA/AR-06/43) Retrieved from <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar06-43.pdf>
25. Ershov, M.A., Grigor'eva, E.V., Khabibullin, I.F. et al. Development of E30 Bioethanol Fuel Composition Based on Low-Octane Fractions of Exhaustive Hydrocarbon Feedstock Processing. Chem Technol Fuels Oils 52, 241–249 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0699-9>
26. Mikhail A. Ershov, Dmitriy A. Potanin, Ekaterina V. Grigorieva, Tamer M. M. Abdellatif, Vladimir M. Kapustin. Discovery of a High-Octane Environmental Gasoline Based on the Gasoline Fischer–Tropsch Process. Energy & Fuels 2020, 34 (4) , 4221–4229. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00009>
27. Кожушко М. І., Лудин А. М., Реутський В. В. Використання спиртових відходів // Хімічна промисловість України. – К., 2014. – № 1 (120). – С. 22–25.
28. Експлуатаційні властивості альтернативних моторних палив на основі оксигенатів / Полункин Е.В., Каменева Т.М., Пилявский В.С. и др. // Катализ и нефтехимия. – 2012. – № 20. – С. 70–74.
29. Оноиченко С.М. Розробка і дослідження композицій неетилованих бензинів, що містять етанол: дис. канд. техн. наук : 05.17.07/ Оноиченко Світлана Миколаївна. – М.: 2000. – 168 с
30. Упровадження гармонізованих технічних вимог до якості авіаційного бензину та палива для реактивних двигунів / С. В. Бойченко, А. В. Яковлева, І. О. Шкільнюк // Енерготехнологии и ресурсосбережение. – 2016. – № 1. – С. 23–32.
31. Экологические аспекты использования моторных топлив (Обзор) / С. В. Бойченко, И. А. Шкільнюк, Л. Н. Черняк, Ю. С. Макаренко, Ю. В. Карелин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 5–6. – С. 35–44.
32. Порівняльна характеристика екологічних ризиків під час використання традиційних та альтернативних палив / А. К Антропченко, А. В. Яковлева, В. О. Хрутьба, С. В. Бойченко // Вісник Національного транспортного університету. – 2016. – № 2. – С. 3–12.
33. Аналіз екологічних властивостей компонентів традиційних і альтернативних авіаційних бензинів / С. В. Бойченко, Л. І. Павлюх, І. О. Шкільнюк, А. В. Яковлева, І. В. Матвеева, А. В. Гудзь // Наукоємні технології. – 2019. – № 2. – С. 195–206.
34. Ідентифікація ризиків, що виникають під час використання традиційних і альтернативних авіаційних палив: екологічний ризик / С. В. Бойченко, В. О. Хрутьба, А. В. Яковлева, А. К. Антропченко // Наукоємні технології. – 2016. – № 1. – С. 116–122.
35. Влияние состава и свойств топлива на рабочий процесс двигателя / С. В. Бойченко, Г. М. Кухаренко, Д. Г. Гершань, Л. Н. Черняк, И. О. Шкільнюк // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2018. – № 3. – С. 11–16.
36. Крайнюк О.В. , Буц Ю.В. , Барбашин В.В. Контроль якості моторних палив з метою забезпечення відповідності вимогам безпеки // Вісник ХНАДУ. - 2019, т. I, вип. 86. – С. 80–89.
37. Григор'єв А. О., Кисельов В. П., Кисельов Ю. В. Альтернативний метод визначення детонаційної стійкості моторних палив // Вісті Академії інженерних наук України. – 2002. – № 3(16) – С. 79–82.
38. Яковлева А. В. Упровадження гармонізованих технічних вимог до якості авіаційного бензину та палива для реактивних двигунів / А.В. Яковлева, С.В. Бойченко, І.О. Шкільнюк // Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2016. – № 1. – С. 23–31.
39. Sergii Boichenko, Iryna Shkilniuk. Cause-and-effect analysis of microbiological contamination of motor fuels and prospects for the rational use of biodegradation in the processes of recycling waste from the technosphere // Development of scientific, technological and innovation space in Ukraine and EU countries. – 3rd ed. – Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2021. – 416 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-151-0-31>

S. Boichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

I. Shkilniuk¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8808-3570

A. Yakovlieva¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7618-7129

S. Dokshyna¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-8136-8779

I. Kuberskyi¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-3800-8484

O. Sibilieva², Cand. Sc. (Vet), ORCID 0000-0001-5339-7214

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²State Environmental Inspectorate

SYSTEMATIC INFORMATION BASE OF ENERGY-EFFICIENT APPLICATIONS FOR AVIATION PETROL

The additives in petrol was started to use in the first half of the twentieth century. In the late 1970s, a qualitative conceptual change in the development of this area of science and practice took place. Environmental pollution from harmful emissions led to the modification of petrol formulations and structural improvements of engines. The problem of improving the quality of gasoline and fuels for jet engines is usually solved in two ways: by developing high-quality new products and by efficient use of traditional ones.

The proposed work analyses the scientific literature on energy-efficient additives to aviation gasoline and, on this basis, creates a systematic information base, namely: classification of the range of additives to gasoline (by the following features: chemical, physical and biological stability enhancers; flash point modifiers; combustion modifiers; washing; dopes that promote efficient operation of fuels at low temperatures; friction modifiers; marking agents; anti-corrosion agents; safety enhancers; surface-active property modifiers) and the range of anti-detonation and environmental (anti-emission) additives in aviation petrols.

The following additives are manufactured and approved for use in Ukraine: poly-functional additives representing a complex mixture of manganese compounds and mixtures of paraffinic and naphthenic hydrocarbons (TU 30218597.001[in Ukrainian] "Poly-functional additives "Eco-Octane". Technical specifications"); iron-containing multifunctional additives "Standard"; there are also known developments of oxygenates based on methanol, ethanol and other alcohols, alcohol processing products, ethers and other oxygen-containing compounds.

The research is being carried out within the framework of the project "Development of a technology for the production of new environmentally friendly high-octane aviation gasoline from domestic raw materials" at the expense of the state budget in accordance with the Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 12 August 2022 No. 713-r "Pro zatverdzhennia pereliku naukovo-tekhnichnykh (eksperymentalnykh) rozrobok v ramkakh vykonannia derzhavnoho zamovlennia na naivazhlyvishi naukovo-tekhnichni (eksperymentalni) rozrobky ta naukovo-tekhnichnu produktsiiu u 2022 rotsi" [in Ukrainian] (registration number 2020.01/0242).

Keywords: aviation gasoline, quality, energy efficiency, additives to aviation gasoline, dopes to aviation gasoline, information, database.

References

- 1.Boichenko, S.V. (2001) *Rational use of hydrocarbon fuels*. NAU [in Ukrainian].
- 2.Boichenko, S. V., Ivanov, S. V. & Burlaka, V. H. (2005) *Motor fuels and oils for modern technology: A monograph*. NAU [in Ukrainian].
- 3.Boichenko, S. V. & Spirkin, V. H. (2009) *Introduction to the chemotology of fuels and oils: a textbook. Part 1*. Odesa: Astroprint [in Ukrainian].
- 4.Boichenko, S. V. & Spirkin, V. H. (2009) *Introduction to the chemotology of fuels and oils: a textbook. Part 2*. Odesa: Astroprint [in Ukrainian].
- 5.Boichenko S.V. *Aviation Fuels and Lubricants: Manual*/S.V. Boichenko, M.M. Zakharchuk.–K.NAU, 2012.– 184 p.
- 6.S. Boichenko, A. Pushak & P. Topilnytskyi and al. (2017) *Motor fuels: properties and quality: textbook*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].
- 7.V. Boichenko, A. V. Yakovlieva, O. O. Vovk, M. M. Radomska, L. M. Cherniak, I. O. Shkilniuk. *Fundamentals of Chemmotology*. – K.: National Aviation University, 2019, 296 p.
- 8.Boichenko S., Yakovlieva A., Lejda K., Kurdel P. *Modern Road Transport's Operational materials*. Technical University of Košice, 2020. 279 p, ISBN: 978-80-553-3646-64.
- 9.Vision 2050: A pathway for the evolution of the refining industry and liquid fuels. *FuelsEurope*. [Online]. Available: <https://www.fuelsEurope.eu/publications/publications/vision-2050-a-pathway-for-the-evolution-of-the-refining-industry-and-liquid-fuels> Accessed on: March 28, 2023
- 10.Yarmoliuk, B.M., Korotkova, N.P. & Bereza, L.I. (2006). Trends in the use of petrol additives. *Kataliz i neftehimija*, №14, 53-70 [in Russian].
- 11.Mayur Jadhav, Swati Jadhav and Supriya Chavan. Application of additives with gasoline fuel: A review // 3S Web Conf. 6th International Conference on Energy and City of the Future (EVF'2019). Volume 170, 2020. 6 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017001026>.
- 12.Boichenko, S.V. , Posypaiko, M.A. & Lychmanenko, O.H. (2016). Prospects for replacing ethyl fluid with aliphatic alcohols in aviation petrol: impact on environmental friendliness. *Naukoiemni tekhnolohii*, № 1(29), 107–115 [in Ukrainian].

- 13.Boichenko, S. V. , Kondakova, O. H. (2016). Anti-detonation properties of aviation petrols and ways to ensure them. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, № 2, 21-27 [in Ukrainian].
- 14.Aksonov, O. F., Boichenko, S. V. & Azarenkova, A. O. (2014). Prospects and disadvantages of using bioethanol additives to motor fuel blends. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 30, 3-8 [in Ukrainian].
- 15.Kondakova O., Boichenko S. (2018) Environmentally Clean Reformulated Aviation Gasoline. In: Karakoç T., Colpan C., Şöhret Y. (eds) *Advances in Sustainable Aviation*. Springer, Cham. Kondakova, O., & Boichenko, S. (2017). Environmentally clean reformulated aviation gasoline. *Advances in sustainable aviation* (pp. 3-14) doi:10.1007/978-3-319-67134-5_1
- 16.Boychenko, S.V., Boychenko, M.S., Lychmanenko, O.G. Effect of additives on properties of aliphatic alcohols gasoline: Analytical review (2015) *Science-Intensive Technologies*, 1 (25), pp. 86-92.
- 17.Boychenko,S.Causal analysis of aviation gasoline modification (2015)Proceedings of the National Transport University, 2(32), pp. 3-13.In S.V. Boychenko, O.G. Lychmanenko (Eds.).Series "Engineering".Scientificandtechnical collection 3
- 18.Boichenko, S. V., Lanetskyi, V. H.&Cherniak, L. M. and al. (2017). Study of the influence of cavitation treatment on the octane number of motor petrol. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, № 2, 107-114 [in Ukrainian].
- 19.Boichenko, S. V., Boichenko, M. S. & Lychmanenko, O. H. and al. (2015). Effect of aliphatic alcohol additives on petrol properties: an analytical review. *Naukoiemni tekhnolohii*, № 1, 86-92 [in Ukrainian].
- 20.Tselishchev, O. B., Loria, M. H. & Kudriavtsev, S. O. and al. (2020). Methods of conversion of n-alkanes into high-octane components for motor fuels: [collective] monograph. *Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia*. pp. 189-194 [in Ukrainian].
- 21.Alcohols and Ethers, A Technical Assessment of Their Application as Fuels and Fuel Components, API Publication 4261, 3rd ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2001.
- 22.W. C. Healy, Jr., C. W. Maassen, and R. T. Peterson, A New Approach to Blending Octanes, paper presented at 24th Mid-year Meeting of the American Petroleum Institute's Division of Refining, New York, May 27, 1959/
- 23.Austin, Wes; Stanley, David; and Thom, Melanie, "Testing the Effects of a Bio-Derived Alternative Aviation Gasoline on Aircraft Materials In Comparison to 100 Low Lead Aviation Gasoline" (2013). *Aviation Technology Graduate Student Publications*. Paper 29.<http://docs.lib.purdue.edu/atgrads/29>.
- 24.Federal Aviation Administration (2006). Spark Ignition Aircraft Engine Endurance Test of Aviation-Grade Ethanol 85. (FAA Technical Report No. DOT/FAA/AR-06/43) Retrieved from <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar06-43.pdf>
- 25.Ershov, M.A., Grigor'eva, E.V., Khabibullin, I.F. et al. Development of E30 Bioethanol Fuel Composition Based on Low-Octane Fractions of Exhaustive Hydrocarbon Feedstock Processing. *Chem Technol Fuels Oils* 52, 241–249 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0699-9>
- 26.Mikhail A. Ershov, Dmitriy A. Potanin, Ekaterina V. Grigorieva, Tamer M. M. Abdellatif, Vladimir M. Kapustin. Discovery of a High-Octane Environmental Gasoline Based on the Gasoline Fischer–Tropsch Process. *Energy & Fuels* 2020, 34 (4) , 4221-4229. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00009>
- 27.Kozhushko, M. I., Ludyn, A. M. & Reutsky, V. V. (2014) *Utilisation of alcohol waste*. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, № 1 (120), 22–25 [in Ukrainian].
- 28.Polunkyn, E.V., Kameneva, T.M. & Pylivskyi, V.S. and al. (2012). Performance properties of alternative motor fuels based on oxygenates. *Kataliz i neftehimija*, №20, 70-74 [in Russian].
- 29.Onoichenko, C.M. (2000). *Development and research of unleaded petrol compositions containing ethanol*. Dissertation for the degree of Candidate of Sciences: 05.17.07., 168 p.
- 30.Boichenko, S. V., Yakovlieva, A. V. & Shkilniuk, I. O. (2016). *Introduction of harmonised technical requirements for the quality of aviation petrol and jet fuel*. *Energotehnologii i resursosberezhenie*, № 1, 23-32 [in Russian].
- 31.Boichenko, S. V., Shkylniuk, Y. A. & Cherniak, L. N. and al. (2014). *Ekologicheskie aspektyi ispolzovaniya motornykh topliv (Obzor)*. *Energotehnologii i resursosberezhenie*, № 5-6, 35-44 [in Russian].
- 32.Antropchenko, A.K., Yakovlieva, A.V.&Khrutba, V.O.and al.(2016). *Comparative characteristics of environmental risks when using traditional and alternative fuels*. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, № 2, 3-12 [in Ukrainian].
- 33.Boichenko, S. V., Pavliukh, L. I. & Shkilniuk, I. O. and al. (2019). *Analysis of environmental properties of components of traditional and alternative aviation petrols*. *Naukoiemni tekhnolohii*, № 2, 195-206 [in Ukrainian].
- 34.Boichenko, S. V., Khrutba, V. O. & Yakovlieva, A. V. and al. (2016). *Identification of risks arising from the use of traditional and alternative aviation fuels: environmental risk*. *Naukoiemni tekhnolohii*, № 1, 116-122 [in Ukrainian].
- 35.Boichenko, S. V., Kukharensk, H. M. & Hershman, D. H. and al. (2018). *Influence of fuel composition and properties on engine operation*. *Energotehnologii i resursosberezhenie*, № 3, 11-16 [in Russian].
- 36.Krainiuk, O.V. , Buts,Iu.V. & Barbashyn V.V. (2019). *Quality control of motor fuels to ensure compliance with safety requirements*. *Visnyk KhNADU*, №86, 80–89 [in Ukrainian].
- 37.Hryhoriev, A. O., Kyselov, V. P. & Kyselov Yu. V. (2002). *An alternative method for determining the detonation stability of motor fuels*. *Visti Akademii inzhenernykh nauk Ukrainy*, № 3(16), 79–82 [in Ukrainian].
- 38.Yakovlieva, A.V., Boichenko, S.V. & Shkilniuk, I.O. (2016). *Introduction of harmonised technical requirements for the quality of aviation petrol and jet fuel*. *Energotehnologii ta resursozberzhennia*, № 1, 23–31 [in Ukrainian].
- 39.Sergii Boichenko, Iryna Shkilniuk. Cause-and-effect analysis of microbiological contamination of motor fuels and prospects for the rational use of biodegradation in the processes of recycling waste from the techno sphere // Development of scientific, technological and innovation space in Ukraine and EU countries. – 3rd ed. – Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2021. – 416 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-151-0-31>

Надійшла: 18.04.2023

Received: 18.04.2023

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ БУДІВЛЕЮ «АРІАНТ»

Швидкість розвитку технологій автоматизованих систем обумовлює регулярне оновлення, створення нових технічних рішень у цій галузі, не виключенням є ніша домашньої автоматизації. Впровадження «розумних» систем моніторингу та управління будівлями покликане забезпечити підвищення рівня енергоефективності процесів, що пов'язані зі споживанням енергії, а також комфорту і безпеки цих процесів. На ринку пропонується безліч варіантів таких систем [1,2,3]. На сьогодні існують державні документи, що регламентують питання проектування, монтування та експлуатації відповідних систем[4]. Але проблеми критеріїв вибору компоновки та функцій системи, розуміння та коректного використання її можливостей є вкрай гострими та відкритими. Окрім цього, відкритим залишається питання впливу роботи автоматизованої системи окремої будівлі на характеристики зовнішнього енергопостачання. Адже погіршення зовнішніх умов призведе до збільшення втрат при доставці енергресурсу, відповідно, збільшення тарифу на доставку відповідного ресурсу.

Метою даної статті є розробка інтелектуальної системи моніторингу та управління будівлею, інтелектуалізація розробленої системи.

Ключові слова: система управління, автоматизована система, інтелектуальна система, програмований логічний контролер (ПЛК), споживач-регулятор, режими роботи електроенергетичної системи.

Вступ. В сучасному світі автоматизовані системи управління будівлями (Building management system) передбачають управління всіма системами, починаючи з вентиляції та закінчуючи підвищенням енергоефективності. Головна вимога для будь якої автоматизованої системи є наявність мережної архітектури, де вузли з'єднані певними лініями зв'язку. АСУ повинні створюватись на базі програмно-технічних засобів, які здійснюють моніторинг технологічних процесів і процесів управління інженерними системами та забезпечують передачу інформації про їх стан у реальному часі для наступної обробки з метою оцінювання, передбачення і ліквідації наслідків дестабілізуючих факторів[4].

1.Інтелектуальна система моніторингу та управління будівлею «Аріант»

Розроблена система дозволяє автоматизовано отримувати оперативну та точну інформацію про стан комутаційного обладнання ввідно-розподільних пристроїв, систем електроосвітлення та безперебійного електроживлення, витрат електроенергії. Система забезпечує оперативне реагування експлуатуючого персоналу на аварійні та проблемні ситуації на обладнанні життєзабезпечення будівлі.

Призначення та основні особливості:

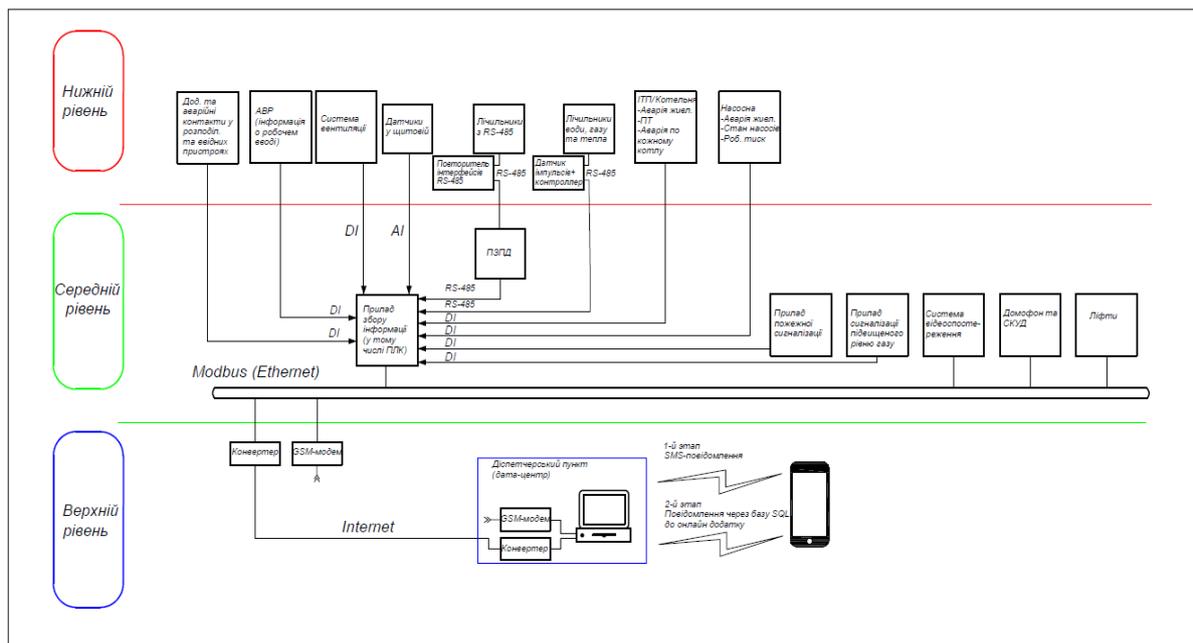
- забезпечення ефективного моніторингу обладнання електропостачання будівлі;
- автоматизація збору інформації про стан об'єкта;
- автоматизований збір показань лічильників;
- предиктивна аналітика, нагадування про проведення регламентних робіт;
- автоматичні повідомлення про нештатні ситуації по SMS, e-mail та Push повідомлення через мобільний додаток;
- забезпечення оперативної реакції обслуговуючого персоналу на аварійні та проблемні ситуації;
- мобільний додаток співробітника керуючої компанії.
- скорочення витрат керуючих компаній на управління, технічне обслуговування та утримання будівель.

Склад системи та основні можливості. Традиційно автоматизовані системи будівель мають структурну схему, що складається із трьох рівнів:

-верхній рівень (Management Level) – це диспетчеризація та адміністрування, а також робота з базами даних та статистичними функціями. На даному рівні здійснюється взаємодія між персоналом (операторами, диспетчерами) та системою, що реалізована на базі комп'ютерних засобів та SCADA-систем.

-середній рівень (Automation Level) – це автоматизоване управління функціональними процесами. Основні компоненти даного рівня: контролери управління, модулі введення-виведення сигналів, а також різне комутаційне обладнання. Саме на даному рівні і відбуваються процеси інтелектуалізації автоматизованої системи.

-нижній рівень (Field Level) рівень кінцевих пристроїв з функціями входу/виходу. Рівень включає в себе різні датчики, виконавчі механізми, кабельні з'єднання між пристроями та нижнім/середнім рівнями.



Вбудоване програмне забезпечення дозволяє налаштувати контролер та підключені до нього пристрої, писати сценарії автоматизації, зберігати та переглядати архів вимірювань.

Інтерфейси та комунікації:

- 2× Ethernet 10/100;
- 2× USB Host;
- Wi-Fi 802.11n(AP, client);
- Bluetooth 4.0;
- 2×RS-485;
- 1× CAN;
- 2×1-Wire/дискретні входи;
- 4 × дискретні/аналогові входи/виходи «відкритий колектор».

Додатково, за допомогою модулів розширення:

- NBIoT/2G/3G/4G (LTE);
- Модеми на дві SIM-карти формату nano SIM;
- Z-Wave та Zigbee.

Вбудоване ПЗ контролера містить гнучкий інструмент написання скриптів Javascript-подібною мовою.

За допомогою скриптів можна автоматизувати будь-які дії: керувати освітленням, опаленням чи технологічним процесом.

Контролери гнучко конфігуруються під конкретне завдання за допомогою модулів розширення та введення-виводу.

Відно-розподільні пристрої з аварійними, додатковими контактами та реле напруги.

Автоматичні вимикачі типу ВА-99-125...400 доукомплектуються додатковим та аварійним контактами (комплект) mscb99-a-104, типу ВА 47-63...125 укомплектовані додатковим mdcb-47-рго та аварійним mdac-47. Пристрої, в яких немає можливості встановлення додаткових та аварійних контактів, встановлюються модульні інтерфейсні реле (для відстеження наявності напруги).

Підключення додаткових та аварійних контактів відбувається до модулів введення.

Лічильники електроенергії підключені за інтерфейсом RS-485 безпосередньо або через пристрій збирання та передачі даних (ПЗПД) до керуючого контролера.

Лічильники підключені шлейфом за інтерфейсом RS-485 до порту контролера. У разі наявності ПЗПД (Пристрій Збору та Передачі Даних – це спеціальна серія пристроїв для збору та передачі даних із вбудованим модемом GPRS зв'язку), підключення до цього пристрою відбувається за допомогою інтерфейсу RS-485 (Modbus RTU) до вбудованого порту контролера.

Центральний диспетчерський пункт на базі SCADA системи для централізованого збору та обробки інформації з усіх житлових будівель, обладнаних даною системою по дротових (оптика) та бездротових (GSM) каналах зв'язку.

Для централізованого збору та обробки інформації створено центральний диспетчерський пункт на базі персонального комп'ютера із встановленою SCADA системою.

SCADA система здійснює збирання та архівування інформації з віддалених контролерів через Ethernet, а також через вбудовані в контролери модеми 2G/3G/4G.

SCADA система формує на основі отриманих даних архів у вигляді таблиць баз даних, які надалі є джерелом даних для мобільного додатка для співробітника керуючої компанії.

Системи відеоспостереження, домофонії та СКУД підключені через Ethernet (RTSP, Modbus TCP).

У систему вбудовані камери з підтримкою RTPS потоку.

Системи СКУД, пожежної сигналізації, підключені до системи через сухий контакт на модулі дискретного введення контролера.

Для отримання інформації та повідомлень у системі використовуються чат-боти популярних месенджерів.

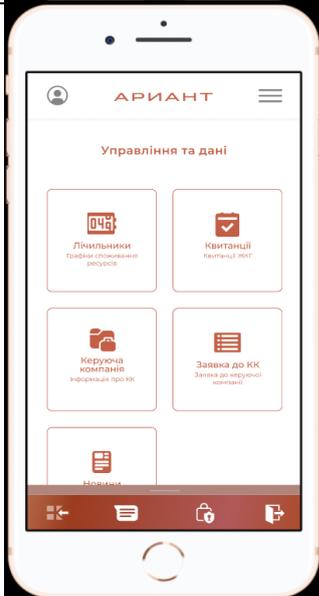
За допомогою контролера та програмного забезпечення реалізується взаємодія чат-бота з користувачем. Можна настроїти будь-які повідомлення про зміну стану вхідних контактів контролера та підключеної периферії, а також налагодити команди для керування виконавчими пристроями.

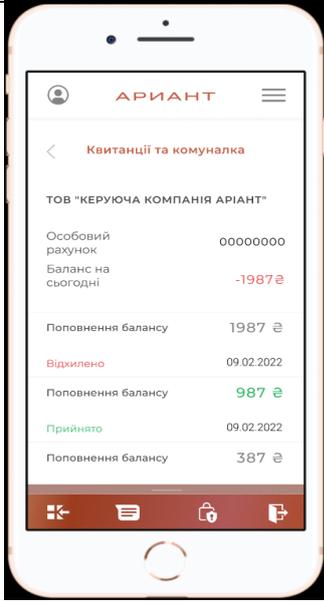
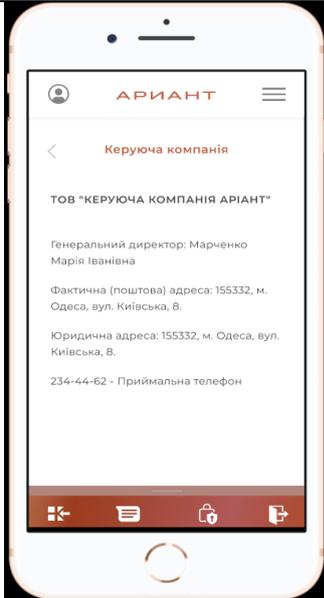
Мобільний додаток «Аріант».

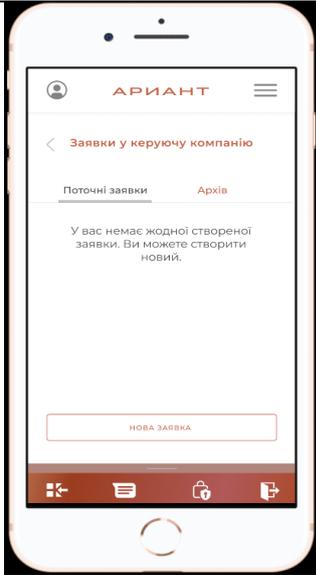
Родзинкою системи є наявний мобільного додатку, який може бути встановлений на мобільний телефон кінцевих користувачів, співробітників керуючої компанії тощо. Додаток має зручний інтерфейс, тож користувачі додатку з легкістю опанують дозволені їм функції та можливості.

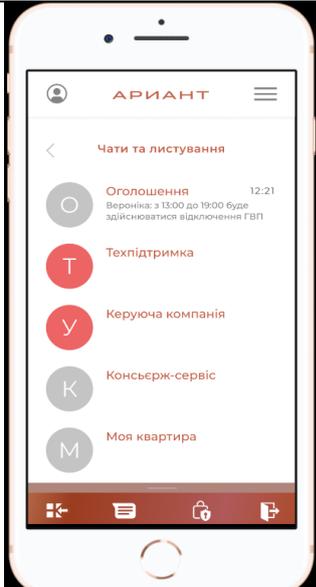
Зовнішній вигляд та функціонал мобільного додатка

<p>1.1</p>	<p>Авторизація та реєстрація.</p> <p>В якості логіну виступає номер мобільного телефону кінцевого користувача. Для підтвердження мобільного телефону використовується SMS-підтвердження. Пароль користувача повинен відповідати таким вимогам:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Довжина пароля повинна бути не менше ніж 8 і не більше 14 символів. 2. Пароль повинен складатися з букв латинського алфавіту (A-z), арабських цифр (0-9) та спеціальних символів, наведених у п. 4 цих вимог. 3. Літерна частина пароля повинна містити як малі, так і великі (великі) літери. 4. Пароль повинен містити не менше одного з наступних символів: (. , : ; ? ! * + % - < > @ [] { } / \ _ { } \$ #). <p>Якщо пароль був забутий, користувач може натиснути кнопку «Забули пароль?». Для відновлення доступу до програми, користувачеві буде направлена інструкція з відновлення доступу, на мобільний телефон або прив'язану адресу електронної пошти.</p>	
------------	--	---

<p>1.2</p>	<p>Профіль користувача У цьому розділі вказується: інформація про користувача, фото користувача, інформація про об'єкт, переключення між об'єктами (якщо їх кілька), створення облікових записів для співмешканців, зміна пароля</p>	
<p>1.3</p>	<p>Розділ «Послуги» Розділ містить наступні підрозділи (іконки для переходу до підрозділу): - лічильники; - квитанції; - керуюча компанія; - заявки в керуючу компанію (КК); - новини.</p>	

1.4	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Лічильники» Підрозділ містить інформацію про поточні показання приладів обліку (лічильники електроенергії, холодної води, гарячої води, тепла). Для перегляду детальної інформації про витрати, графіки споживання та середні витрати, користувачу необхідно натиснути на відповідні показання та перейти до підрозділу.</p>	
1.5	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Квитанції» Підрозділ містить таку інформацію:</p> <ul style="list-style-type: none"> - відображення списку квитанцій від керуючої компанії по кожному особовому рахунку користувача (дата та сума квитанції, баланс особового рахунку на дату квитанції); - інформація щодо кожного особового рахунку – номер особового рахунку, поточний баланс, інформація про обслуговуючу компанію; - після переходу до інформації щодо конкретної квитанції відображається інформація – особовий рахунок, баланс особового рахунку на дату квитанції, обслуговуюча компанія, сума нарахувань; - можливість оплачувати квитанції за допомогою стороннього обслуговування прийому платежів. - для оновлення даних за квитанціями керуюча компанія має передавати дані на сервер «АРИАНТ» засобами особистого кабінету співробітника КК. 	
1.6	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Керуюча компанія» (КК) У цьому розділі наведено загальну інформацію про керуючу компанію:</p> <ul style="list-style-type: none"> - найменування керуючої компанії; - інформація про керівника; - Реквізити компанії; - Номери телефонів; - Адреса електронної пошти; - Сайт компанії; <p>Ця інформація заповнюється керуючою компанією через особистий кабінет співробітника.</p>	

<p>1.7</p>	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Заявка до КК» В даному розділі є можливість: - створення заявок у керуючу компанію. Під час створення заявки необхідно вказати тему та текст заявки. Крім цього, є можливість додавання документів до заявки; - перегляд активних та архівних заявок: наданий номер заявки, текст заявки, дата створення заявки, статус, дата останньої зміни; - можливість написати співробітнику керуючої компанії, відповідального за виконання відповідної активної заявки.</p>	
<p>1.8</p>	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Новини» У цьому розділі відображаються останні новини. Крім цього, у цьому розділі керуюча компанія може викладати оголошення, призначені всім мешканцям житлового комплексу.</p>	
<p>1.9</p>	<p>Розділ «Послуги». Підрозділ «Перепустки» Підрозділ забезпечує можливість замовляти гостьові перепустки за допомогою відправки заявки до керуючої компанії. У підрозділі відображаються оформлені перепустки і є можливість оформити новий, для чого необхідно вказати таку інформацію: - Інформація про гостя – ПІБ, номер телефону; - Інформація про транспортний засіб – держ. номер ТС, марка ТС; - Тип пропуску – разовий чи тимчасовий; - Дата та час відвідування; - можливість залишити коментар для КК; - Можливість заповнення даних про відвідувача зі списку контактів телефону.</p>	

1.10	<p>Розділ «Чати» У цьому розділі є можливість спілкування у наступних чатах:</p> <ul style="list-style-type: none"> - чат з керуючою компанією; - чат з мешканцями житлового комплексу; - чат із технічною підтримкою. 	
------	---	---

Інтелектуалізація системи «Аріант»

Гнучкість системи, використання ПЛК дають широкі можливості встановлення стороннього програмного забезпечення за допомогою написання скриптів Javascript. Саме скрипти є інструментом інтелектуалізації системи «Аріант». В рамках даної статті автори поставили перед собою завдання запропонувати метод управління електричним навантаженням, який дасть позитивний ефект для кінцевого споживача у вигляді зменшення вартості електричної енергії за умови позитивного системного ефекту для енергосистеми. Запропонований метод може бути прописаний у вигляді скрипту та стати елементом інтелектуальної автоматизації системи «Аріант».

Ідея методу полягає в переносі частини добового споживання електричної енергії кінцевого споживача з «пікової» та «напівпікової» зон в зону «провала» роботи енергосистеми. Даний перенос дасть можливість ефективно використовувати тарифи, диференційовані за періодами часу в оплаті за електричну енергію. З іншого боку такий перенос позитивно буде впливати на режими роботи системи електропостачання за місце підключення будівлі у вигляді вирівнювання графіка навантаження електричного навантаження.

У якості ресурсу для переносу часу роботи будуть використовуватись так звані споживачі-регулятори[5,6]. Споживачі, які мають властивості опосередкованого накопичення електричної енергії, або їх роботу можна перенести без суттєвого дискомфорту для кінцевого користувача – електричний водяний нагрівач (ЕВН), електричне опалення (ЕО), пральна машина, мультиварка тощо.

При хаотичному переносі роботи споживачів-регуляторів в зону «провал» виникає небезпека їх одномоментного включення на початку відповідної зони.

Таким чином, в такому випадку структурна схема алгоритму функціонування системи Аріант буде виглядати наступним чином:

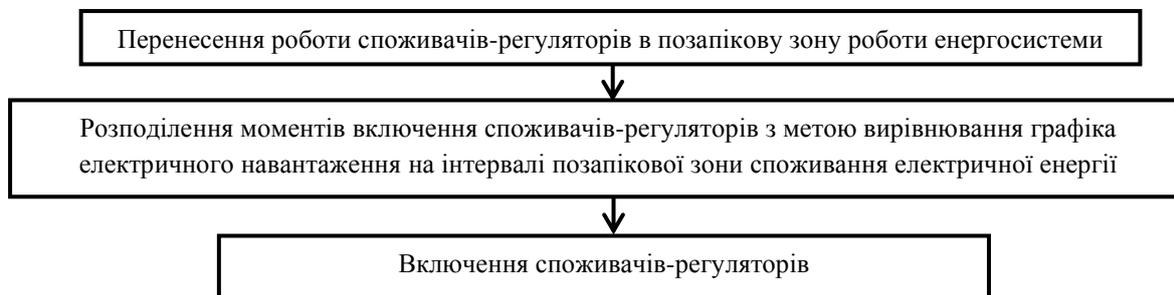


Рисунок 2 - Схема алгоритму керуючих дій системи «Аріант»

Теоретична основа рішення задачі управління

Як відомо, значення максимуму середнього навантаження, наприклад, за струмом на інтервалі довжиною Θ , $I_{\Theta M}$, можна знайти за формулою:

$$I_{\Theta M} = I_C + \beta \sqrt{DI_{\Theta}} \tag{1}$$

де I_C – середнє значення навантаження;

DI_{θ} – дисперсія середніх значень навантажень I_{θ} (на інтервалах θ);

B – коефіцієнт, що залежить від допускаємої ймовірності перевищення навантаженням I_{θ} значення

$I_{\theta M}$.

Дисперсію DI_{θ} розраховують за формулою Г.М. Каялова:

$$DI_{\theta} = (2/\theta^2) \int d\tau [K_I(\tau)] d\tau \quad (2)$$

де $K_I(\tau)$ – автокореляційна функція процесу (графіка) $I(t)$ зміни навантаження.

Як дисперсія DI миттєвих значень навантаження, так і дисперсія DI_{θ} є показниками нерівномірності графіка навантаження. За визначенням дисперсії DI є різницею між квадратами середньоквадратичного $I_{СК}$ і середнього I_C навантажень, чи відповідно:

$$DI_{\theta} = I_{\theta СК}^2 - I_{\theta C}^2 = I_{\theta СК}^2 - I_C^2 \quad (3)$$

де $I_{\theta СК}$ – середньоквадратичне значення процесу $I_{\theta}(t)$;

$I_{\theta СК\theta}$ – середньоквадратичне значення навантаження за інтервал θ .

Враховуючи, що $I_{\theta C} = I_C$

Між DI та DI_{θ} існує функціональна залежність, яка визначається видом функції $K_I(\tau)$; в практичних розрахунках рекомендується користуватись наступними формулами:

$$DI_{\theta} = (2t_u/\theta) DI (e^{-\theta/t_u} - 1 + \theta/t_u) \quad (4)$$

Вираз (4) відповідає марківській моделі процесу $I(t)$;

Або формулою:

$$DI_{\theta} = DI (1 - \theta/t_u) \quad (5)$$

де t_u – тривалість циклу роботи електроприймачів.

Формула (3) може бути переписана у вигляді:

$$\Delta W = 3R(I_C^2 + DI)T = 3RTI_C^2 + 3RTDI \quad (6)$$

чи

$$\Delta W = \Delta W_I + \Delta W_{DI} \quad (7)$$

де ΔW – втрати електричної енергії на ділянці мережі;

ΔW_I – основна складова втрат, яка визначається середнім значенням навантаження та, відповідно, значенням електроспоживання W ;

ΔW_{DI} – дисперсійна складова втрат, що визначається дисперсією, тобто нерівномірністю графіка навантаження.

Формула (7) показує шляхи зниження втрат електричної енергії:

1) зменшення основної складової втрат ΔW_I , враховуючи, що $W = 3UI_C T$;

2) зменшення дисперсійної складової втрат ΔW_{DI} .

Викладене вище показує, що при збереженні витрати електричної енергії на технологічний процес, тобто при $I_C = const$, зниження максимуму навантаження та зменшення втрат електричної енергії в мережах можна досягти шляхом організації (синтезу) такого режиму сумісної роботи електроприймачів, при якому груповий графік навантаження, який отримується накладенням індивідуальних графіків навантаження, буде мати мінімальну нерівномірність, тобто буде мати мінімум дисперсії.

Дисперсія DP групового графіка навантаження $P(t) = \sum p_r(t)$ мережі, що живить n електроприймачів з графіками навантаження $p_r(t) = 1, 2, \dots$. В часному випадку $p_r(t)$ можуть бути, в свою чергу, графіками деяких вузлів, наприклад ліній, які формують графік навантаження джерела живлення, наприклад трансформатора.

Дисперсія DP групового графіка навантаження визначається за формулою:

$$DP = \sum_{r=1}^n DP_r + 2 \sum_{r<s} k p_{rs}(t_{rs}) \quad (8)$$

де DP_r – дисперсія графіків навантаження;

$k p_{rs}(t_{rs})$ – взаємо кореляційні моменти ГН r -го та s -го електроприймачів, які визначаються за значенням взаємо кореляційної функції $k p_{rs}(\tau)$ цих графіків при значенні $\tau = t_{rs}$;

t_{rs} – зрушення у часі між графіками $p_r(t)$ та $p_s(t)$, тобто зрушення між моментами включення (відключення) електричних приймачів, для яких визначається взаємокореляційна функція відносно обраного початку відліку.

Очевидно, зменшити величину DP , яка дається формулою (8), можливо лише зменшенням другої суми в правій частині цієї формули – кореляційної складової дисперсії: $D_k(t_{rs}) = 2 \sum_{r<s} k p_{rs}(t_{rs})$.

Таким чином, рішення задачі вирівнювання групового графіка навантаження складається в завданні зрушень t_{rs} між моментами включення електроприймачів, які приводять до мінімуму величини $D_k(t_{rs})$.

Граничним (мінімальним) значенням $D_k(t_{rs}) \in D_k = -\sum_{r=1}^n Dp_r$. Це пояснюється тим, що границею ефекту вирівнювання графіка $P(t)$ є приведення його до виду $P(t) = const$. В цьому випадку будемо мати $D[P(t) = const] = 0$, відси на основі формули для дисперсії $DP = \sum_{r=1}^n Dp_r + 2 \sum_{r < s} kp_{rs}(t_{rs})$ одержуємо сформульоване вище визначення граничного значення $D_k(t_{rs})$.

В умовах побуту невідомо які саме споживачі будуть включатися, що обумовлено людським фактором, тобто визначити взаємно кореляційні моменти ГЕН r-го та s-го електроприймачів заздалегідь не є можливим. У такому випадку доцільно використовувати кореляційні моменти групового графіка навантаження та ГЕН споживача-регулятора. Для спрощення здійснено перехід до понять дисперсії та сформульовано наступну умову:

$$\sum_{r=1}^n (DP_{ГЕН} + Dp_r(t_{ГЕН,r})) \rightarrow \min \tag{9}$$

що є умовою планування розподілення моментів включення споживачів-регуляторів з метою вирівнювання графіка електричного навантаження на інтервалі позапікової зони споживання електричної енергії системи електропостачання.

Управління електричним навантаженням у побуті на рівні житлового будинку

Живлення споживачів-регуляторів організовується за спеціальною схемою, опис якої наведено в [7]. Система електропостачання будинку з можливістю управління режимами роботи кінцевих споживачів показана в [7].

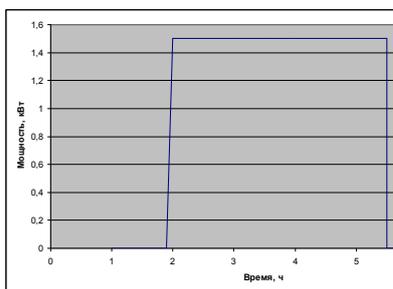
Прилад збору інформації системи Аріант приймає дані щодо складу споживачів-регуляторів, роботу яких можна перенести в зону позапікового споживання. Інформація складається з даних, на базі яких можливо побудувати ГЕН споживача-регулятора[8]. Також до Аріанту надходять профілі графіків добових навантажень будинку в цілому. За критерієм 9 формується графік включення електроприймачів. Керуючі сигнали відправляються на інтелектуальні комутаційні пристрої, через які отримують живлення споживачі-регулятори з відповідною командою на включення.

Зрушення t_{rs} між графіками обираються послідовно («кроками»), а послідовність задається пріоритетним рядом екстремумів (мінімумів) взаємнокореляційної функції (ВКФ): при першому кроці обирається зрушення між першою парою графіків, які мають максимальне негативне значення ВКФ (при цьому кроці); при другому кроці обирається зрушення між парою графіків, негативний екстремум яких займає друге місце в пріоритетному ряду, і т.д. В процесі вибору можлива корективка обраних зрушень, яка викликана необхідністю обліку технологічних обмежень чи іншими причинами.

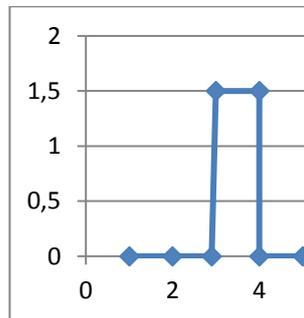
Описане вище рішення застосовується для вирівнювання періодичних графіків навантаження з будь-якою кількістю ступеней. Так як графіки навантаження електричних водонагрівачів є неперіодичними, в силу, по-перше, різної потужності даних пристроїв, по-друге, різної тривалості роботи (рис.3), визначення ВКФ є дуже важким завданням. Для полегшення, з урахуванням того, що

$$kp_{rs}(t_{rs}) = \sqrt{Dp_r Dp_s} \tag{10}$$

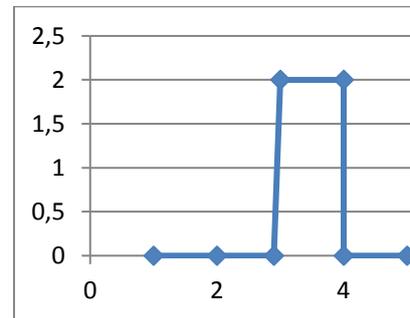
будемо будувати пріоритетний ряд за мінімумом значення дисперсії індивідуальних графіків навантаження електроприймачів.



ГЕН ЕВН потужністю 1,5 кВт при повному завантаженні



ГЕН ЕВН потужністю 1,5 кВт при неповному завантаженні

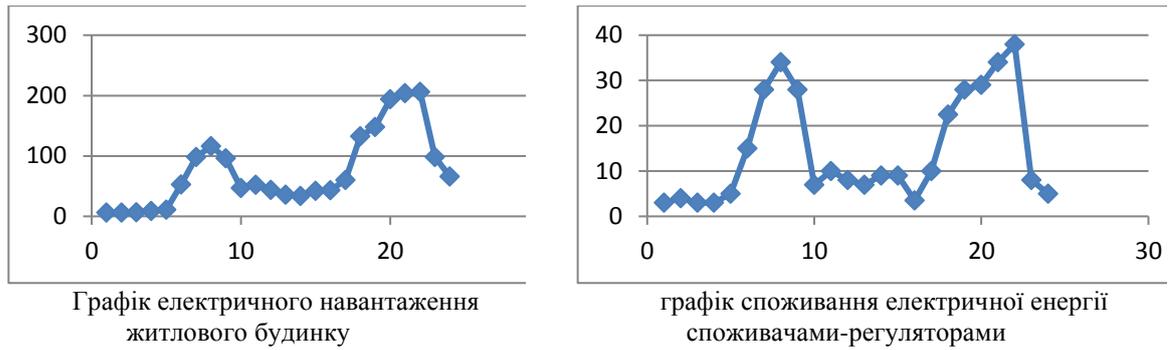


ГЕН ЕВН потужністю 2 кВт при неповному завантаженні

Рисунок 3 – Типові ГЕН споживачів-регуляторів (ЕВН)

Реалізація алгоритму управління

Графік споживання електричної енергії електроприймачами житлового будинку, а також виділений ГЕН споживачів-регуляторів (електричні водяні нагрівачі) будинку до вирівнювання наведено на рис. 4



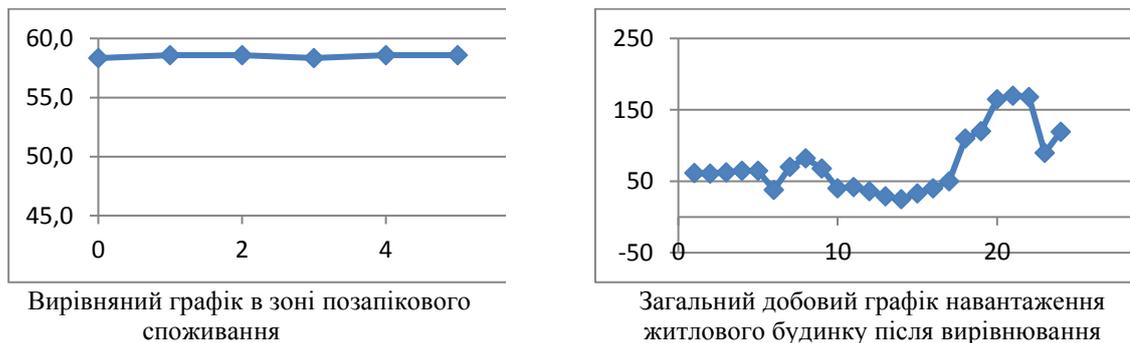
Рисункок 4 – ГЕН до вирівнювання

Розрахункові формули:

Середнє значення навантаження визначається за формулою, кВт:	$p_c = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} p(t) dt$
Середньоквадратичне значення, кВт ² :	$p_{ck} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} p^2(t) dt}$
Дисперсія, кВт ² :	$Dp = p_{ck}^2 - p_c^2$
Коефіцієнт форми:	$k_\phi = \frac{p_{ck}}{p_c}$

Коефіцієнт форми графіка навантаження будинку до вирівнювання складає 1,29.

Графік споживання електричної енергії електроприймачами житлового будинку, а також виділений ГЕН споживачів-регуляторів (електричні водяні нагрівачі) будинку після вирівнювання наведено на рис.5



Рисункок 5 – ГЕН після вирівнювання

Коефіцієнт ГЕН після вирівнювання складає 1,15.

Зменшення втрат електричної енергії в елементах системи електропостачання житлового будинку

Елемент системи електропостачання	Розрахункові формули	Зниження втрат електричної енергії, кВт·год/добу
Силові трансформатори: ТМ-400/6 ТМ-320/6	$\Delta W_{TP} = \Delta W_{XX} + \Delta W_{K3}$ $\Delta W_{XX} = \Delta P_{XX} \cdot T$ $\Delta W_{K3} = k_3 \cdot \Delta P_{K3} \cdot T$	15247,72
Лінії електропередавання (від ТП до будинку)	$\Delta W = \int_0^T \Delta P(T) dT \Rightarrow \Delta W = R \int_0^T I^2(T) dT$ $\delta W = \Delta W_H \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 2}^2}{k_{\phi 1}^2}\right)$ $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}$ – коефіцієнти форм графіка навантаження відповідно до вирівнювання і після нього; ΔW_H – втрати навантажень в електричній мережі при коефіцієнті форми $k_{\phi 1}$	8599,995

Висновки. Впровадження інтелектуальних систем моніторингу та управління в житловому секторі потребує чіткого розуміння мети та очікуваних результатів. Інтелектуалізація таких систем дозволяє отримати максимальний ефект для користувачів без негативних наслідків для електропостачальних компаній та компаній операторів розподілу електричної енергії.

Розроблена система Аріант зі своєю гнучкою конфігурацією у повному обсязі відповідає сучасним потребам будівель, може бути інтелектуалізованою та реалізовувати методи, прописані у вигляді скріптів. За рахунок наявності мобільного додатку є зручною та зрозумілою до використання.

Список використаної літератури

1. Products of BMS. <https://deltacontrols.com/products/>
2. Системи автоматизації будівлі. https://www.geze.ua/uk/produkti-ta-rishennja/avtomatizacija_budivli/sistemi_avtomatizaciji_budivli/c_37540
3. Системи автоматизації й контролю будівель. <https://www.se.com/ua/uk/work/products/building-automation-and-control>
4. ДСТУ-Н Б В.2.5-37 «Настанова з проектування, монтування та експлуатації автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями та спорудами», затверджений Наказом Міністерства розвитку громад та територій України №79 від 18.02.2008 Про прийняття національного стандарту ДСТУ-Н Б В.2.5-37:2008
5. Лазуренко О.П., Лисичкина Д.С., Черкашина Г.І. Новий підхід до класифікації споживачів електричної енергії Світлотехніка та електроенергетика. 2008 р., №1, стр. 76 – 80;
6. Лазуренко О.П., Черкашина Г.І. Акумулявання енергії в побутовому секторі Світлотехніка та електроенергетика. 2008 р., №4(16), стр. 57 – 63;
7. Щодо принципів відновлення електроенергетичної системи України / О.П. Лазуренко, Л.І. Лисенко, Г.І. Черкашина, Д.А. Шокар'юв // Енергетика: економіка, технології, екологія . – 2022 – №4. – С. 102 – 106 URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/273415>
8. Simona Vasilica Oprea; Adela Bâra; George Ifrim. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm (2018), Computers & Industrial Engineering, Aug. 2018. Vol. 122, Pp. 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.053>
9. Peak Shaving Algorithms for Residential Consumers. A Comparative Study. Ifrim G.; Oprea S.V.; Bara, A. 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2020 - Proceedings, 2020, pp. 37–42. DOI: 10.1109/ICSTCC50638.2020.9259750
10. An automated residential demand response pilot experiment, based on day-ahead dynamic pricing. Vanthournout, K.; Dupont B.; Foubert; W.; Stuckens, C.; Claessens, S. Applied Energy this link is disabled, 2015, 155, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.100>
11. Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy. Farshid Shariatzadeh; Paras Mandal; Anurag K. Srivastava. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 45, May 2015, Pp. 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.062>
12. A novel approach for incorporating incentive-based and price-based demand response programs in long-term generation investment planning. Ali Pourramezan; Mahdi Samadi. International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol. 142, Part B, November 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108315>.

I. Cherneshchuk¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-6895-7843

H. Cherkashyna¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-3773-7498

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

INTELLIGENT BUILDING MONITORING AND MANAGEMENT SYSTEM «ARIANT»

The speed of development of technologies of automated systems determines regular updating, creation of new technical solutions in this field, the niche of home automation is no exception. The implementation of "smart" building monitoring and management systems is designed to ensure an increase in the level of energy efficiency of processes related to energy consumption, as well as the comfort and safety of these processes. Many variants of such systems are offered on the market [1,2,3]. Today, there are state documents that regulate the design, installation and operation of the relevant systems[4]. But the problems of the criteria for choosing the layout and functions of the system, understanding and correct use of its capabilities are extremely acute and open. In addition, the question of the influence of the operation of the automated system of a separate building on the characteristics of the external energy supply remains open. After all, the deterioration of external conditions will lead to an

increase in losses during the delivery of an energy resource, accordingly, an increase in the tariff for the delivery of the corresponding resource.

Keywords: *control system, automated system, intelligent system, programmable logic controller (PLC), consumer-regulator, power system operating modes.*

References

1. Products of BMS. <https://deltacontrols.com/products/>
2. Building automation systems. https://www.geze.ua/uk/produkty-tarishennja/avtomatizacija_budivli/sistemi_avtomatizaciji_budivli/c_37540 (Ukr)
3. Building automation and control systems. <https://www.se.com/ua/uk/work/products/building-automation-and-control> (Ukr)
4. DSTU-N B V.2.5-37 "Instructions for the design, installation and operation of automated systems for monitoring and management of buildings and structures", approved by the Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine №79 from 18.02.2008 About the adoption of the national standard DSTU-N B V.2.5-37:2008 (Ukr)
5. Lazurenko O, Lysyckyna D., Cherkashyna H. A new approach to the classification of electrical energy consumers Lighting and electrical engineering. 2008, №1, pp. 76 – 80 (Ukr)
6. Lazurenko O, Cherkashyna H. Accumulation of energy in the household sector Lighting and electrical engineering. 2008, №4(16), pp. 57 – 63 (Ukr)
7. On the principles of restoration of the ukrainian electric power system/ Lazurenko O, Lysenko L., Shokarov D., Cherkashyna H. // Енергетика: економіка, технології, екологія . – 2022 – №4. – С. 102 – 106 URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/273415> (Ukr)
8. Simona Vasilica Oprea; Adela Bâra; George Ifrim. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm (2018), Computers & Industrial Engineering, Aug. 2018. Vol. 122, Pp. 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.053>
9. Peak Shaving Algorithms for Residential Consumers. A Comparative Study. Ifrim G.; Oprea S.V.; Bara, A. 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2020 - Proceedings, 2020, pp. 37–42. DOI: 10.1109/ICSTCC50638.2020.9259750
10. An automated residential demand response pilot experiment, based on day-ahead dynamic pricing. Vanthournout, K.; Dupont B.; Foubert; W.; Stuckens, C.; Claessens, S. Applied Energy this link is disabled, 2015, 155, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.100>
11. Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy. Farshid Shariatzadeh; Paras Mandal; Anurag K. Srivastava. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 45, May 2015, Pp. 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.062>
12. A novel approach for incorporating incentive-based and price-based demand response programs in long-term generation investment planning. Ali Pourramezan; Mahdi Samadi. International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol. 142, Part B, November 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108315>.

Надійшла: 12.09.2023

Received: 12.09.2023

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289709

В.А. Степаненко¹, аспірант, ORCID 0000-0001-6176-589X
А.І. Замулко¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332
¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО СТИМУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Робота присвячена аналізу напрямів стимулювання розвитку та залучення інвестицій у сферу відновлювальної енергетики України. Наразі будівництво установок ВДЕ відбувається за рахунок "зеленого" тарифу та виключно з позиції комерційної привабливості, без врахування технічних параметрів мережі, а подальше неконтрольоване зростання їх потужностей створює ризики для нормального функціонування енергосистеми країни. Пріоритетність такого тарифного регулювання, яке фактично започаткувало еру інтенсивного розвитку відновлюваної енергетики, вичерпало свій потенціал та потребує заміни на інші механізми державного регулювання.

Механізми стимулювання повинні реалізуватися в ринковий спосіб без втручання в господарську діяльність суб'єктів та з максимальною користю для енергосистеми. До цих механізмів можна віднести аукціони з розподілу квот підтримки та з продажу електроенергії з ВДЕ; прямі договори купівлі-продажу енергії; контракти на різницю; «зелені» надбавки; надання послуг балансування та допоміжних послуг.

Кожний з перерахованих механізмів має свою складову впливу на контрольований та стабільний розвиток відновлюваної енергетики. Тому необхідно використати поєднання цих механізмів стимулювання, яке можливо коригувати відповідно до поточного стану в енергосистемі в будь-який довготривалий момент часу.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, аукціони з розподілу квот підтримки, аукціони з продажу електроенергії, прямі договори купівлі-продажу енергії, контракти на різницю.

Вступ

Стимулювання розвитку відновлюваної енергетики є одним з пріоритетних напрямів державної політики України у сфері електроенергетики. Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 18 серпня 2017 р. № 605-р, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі загального первинного постачання енергії має становити щонайменше 25% [1]. Але під час виступу на *Berlin Energy Transition Dialogue 2023*, Міністр енергетики України Герман Галущенко наголосив на тому, що держава має посилити розвиток відновлюваної енергетики та прискорити енергетичний перехід у зв'язку з пошкодженням об'єктів теплової генерації та мереж систем передачі/розподілу [2]. Розвиток ВДЕ відповідатиме міжнародним стандартам, принципам та практикам ЄС, а також задовольнятиме потреби суспільства та національної економіки в паливно-енергетичних ресурсах у економічно ефективний, технічно надійний, екологічний та безпечний спосіб, гарантуватиме енергетичну безпеку як в мирний час, так і в умовах надзвичайних ситуацій.

Потужність ВДЕ в Україні станом на 31 грудня 2021 року досягла вже 9 656 МВт [3]. Проте, якщо глянути на динаміку росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ за 2018-2021 роки (рис. 1), то активний темп розвитку спостерігається лише за рахунок промислових та домашніх сонячних електростанцій (СЕС).

Нерівномірний розвиток пояснюється тим, що на даний момент будівництво установок чистої генерації енергії здійснюється виключно з позиції комерційної привабливості, а не з позиції економічного розвитку країни, екологічності чи інтересів споживача. Стрімкий розвиток "зеленої" енергетики відбувається без урахування реальних потреб енергетичної системи України у додаткових генеруючих потужностях, що може призвести до дестабілізації функціонування енергосистеми країни й можливості аварійних ситуацій. Також неконтрольоване зростання ВДЕ призводить до таких проблем, як необхідність збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, виникнення вищих гармонік, перетікання реактивної потужності [4].

Також наразі всі власники ВДЕ віддають електричну енергію в мережу на основі договорів купівлі-продажу за "зеленим" тарифом, що укладені з ДП "Гарантований покупець", та є членами його

балансуючої групи. Тобто ДП "Гарантований покупець" відповідає за баланс для таких виробників та повинен викупляти усю відпущену електричну енергію. Але в межах цієї балансуючої групи виникає неможливість ефективного реагування на режими роботи енергосистеми та цінові сигнали ринку, що ускладнює взаємовигідну співпрацю між оператором системи передачі та виробниками електроенергії з ВДЕ з точки зору балансування енергосистеми. Ситуація навіть дійшла до того, що ПрАТ «НЕК «Укренерго» довелося впроваджувати Систему керування обмеженнями ВДЕ, незважаючи на зобов'язання компенсації власникам ВДЕ вартості невикористаної енергії у повному обсязі. Якщо за 2020 р. обсяг обмеженої електроенергії становив 14,7 ГВт, то за 2021р. це значення збільшилося майже в 7 разів та становило 101 ГВт [5].

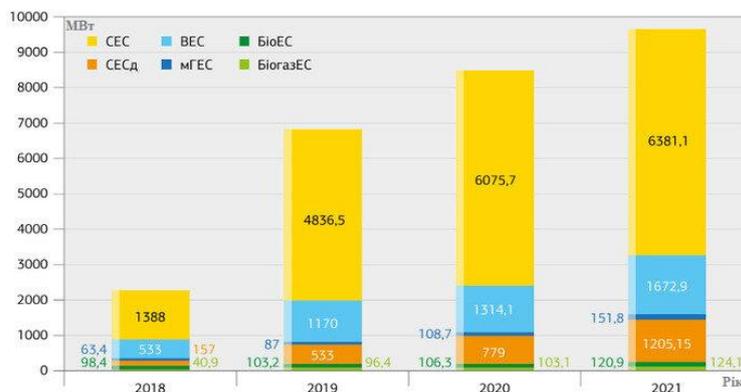


Рисунок 1 – Динаміка росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ [3]

Для вирішення описаних вище проблем необхідна розробка нового та зміна існуючого нормативно-правового забезпечення (законодавчих та підзаконних актів, галузевих норм, які регламентують діяльність в енергетичній сфері тощо), що дозволить стимулювати розвиток відновлюваної енергетики, інноваційних технологій цієї галузі та їх впровадження в життя.

Мета та завдання

Метою статті є аналіз напрямів стимулювання розвитку та залучення інвестицій у сферу відновлювальної енергетики України. Завданнями статті є дослідження можливих механізмів державного стимулювання розвитку відновлюваної енергетики та можливості їх застосування для енергетичної сфери України.

Матеріал і результати досліджень

Для енергетики в період відновлення принциповим буде питання розвитку ВДЕ, при якому ці джерела будуть інтегровані до системи без негативного впливу на неї та з максимальною користю. Проблеми, що пов'язані з цим розвитком, можна розділити на такі групи, як: формування механізмів, що будуть забезпечувати контрольований, ефективний розвиток (державне стимулювання); та питання технічного приєднання (схеми, моделювання параметрів системи в точці приєднання, прогнозування наслідків).

Державне стимулювання розвитку відновлюваної енергетики полягає в наданні підтримки та заохоченні розвитку технологій та проектів, які використовують ВДЕ. Це може бути досягнуто різними способами, включаючи фінансову підтримку, податкові пільги, законодавчі стимули, регулювання ринку, а також надання права на продаж виробленої відновлювальної енергії за підтримки від держави. При цьому механізми державного стимулювання мають відповідати основним принципам державної регуляторної політики України, а саме бути [6]:

-адекватними (форма та рівень державного стимулювання мають відповідати потребі у вирішенні проблеми та ринковим вимогам з урахуванням всіх можливих альтернатив);

-ефективними (дія нормативно-правових актів має забезпечувати досягнення максимально можливих позитивних результатів за мінімально необхідних витрат ресурсів суб'єктів господарювання, громадян та держави);

-збалансованими (стимулююча діяльність повинна забезпечувати баланс інтересів суб'єктів господарювання, громадян та держави);

-передбачуваними (стимулююча діяльність має бути послідовною, відповідною цілям державної політики та планам, в тому числі планам з підготовки проектів регуляторних актів, що дозволяє суб'єктам господарювання здійснювати планування своєї діяльності);

-прозорими та відкритими для громадської думки (регуляторні органи повинні бути відкритими для фізичних та юридичних осіб, їх об'єднань на всіх етапах стимулюючої діяльності та проводити інформування громадськості).

Наразі в різних країнах застосовується широкий спектр стратегій. Проте, який з різних інструментів є найбільш ефективним та дієвим для збільшення частки ВДЕ, все ще залишається темою досліджень, оскільки кожний механізм має свій ряд переваг та недоліків, а також специфіку застосування. Спільним для механізмів стимулювання є те, що вони повинні реалізуватися в ринковий спосіб без втручання в господарську діяльність суб'єктів та з максимальною користю для енергосистеми. Але при цьому держава стикається з такими проблемами та викликами, як:

1. Питання вартісних показників електричної енергії з різних ВДЕ. Різна собівартість електроенергії при простому державному стимулюванні (наприклад, однакового грошового винагородження для різномісних джерел) спричинить нерівномірний розвиток ВДЕ як по самих видах, так і по територіальній насиченості потужностями.

2. Стохастичний характер виробництва електричної енергії з сонячних та вітрових електростанцій. Рух у напрямку збільшення частки цих джерел створює загрозу для ефективного управління розподільною мережею та її належному функціонуванню, тому держава має впроваджувати інструментарій для забезпечення надійності та стабільності енергосистеми.

3. Постійний технічний розвиток енергетичного обладнання, за рахунок якого змінюються та збільшуються варіанти взаємодії електричної мережі та виробників енергії з ВДЕ (наприклад, залучення останніх до надання послуг балансування та допоміжних послуг на ринку електричної енергії).

Запровадження "зеленого" тарифу як економічного стимулу розвитку відновлюваної енергетики став відправною точкою для розвитку альтернативної генерації в різних країнах світу. В Україні цей засіб стимулювання був прийнятий Законом України "Про внесення змін до деяких законів України щодо встановлення "зеленого" тарифу" від 25.09.2008 р. № 601-VI та забезпечував придбання електроенергії від таких джерел, як: малі гідроелектростанції (встановленою потужністю до 10 МВт); вітрові та сонячні електростанції; електростанції, що використовують біомасу як паливо [7].

Важливо розуміти, що основна функція "зелених" тарифів полягає у покритті капітальних інвестицій інвесторів ВДЕ, тобто вони повинні враховувати фактичні витрати на будівництво проєктів ВДЕ. Якщо глянути на питомі капітальні витрати на виробництво електричної енергії з ВДЕ (рис. 2), то можна спостерігати збільшення витрат на виробництво електричної енергії з гідро- та геотермальних станцій, незначне зменшення з біостанцій та значне скорочення витрат з сонячних та вітрових станцій.

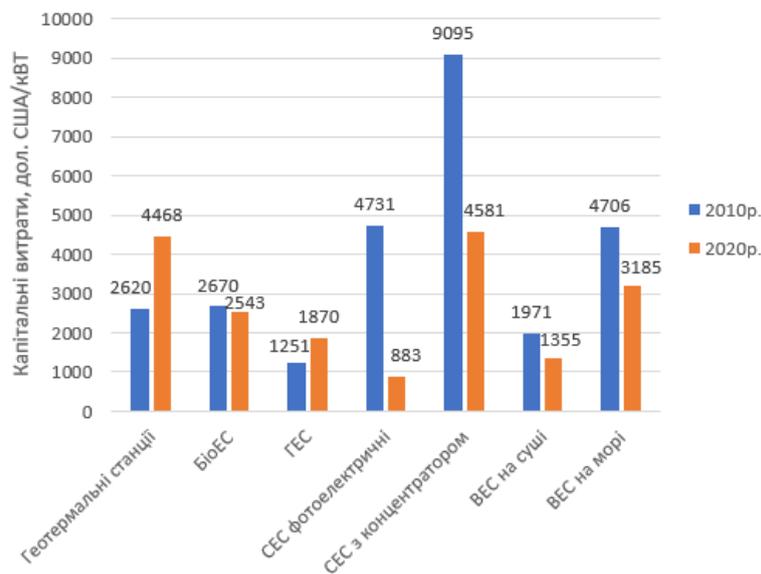


Рисунок 2 – Питомі капітальні витрати на виробництво відновлюваної електричної енергії у світі за 2010р. та 2020р. [8]

Проте в Україні "зелений" тариф залишається одним з найвищих не лише в Європі, а й у світі: до 2030 року вони фіксуються на рівні 10—15 євро-центів за 1 кВт год, що втричі більше від країн ЄС. Тому будівництво установок ВДЕ відбувається виключно з позиції комерційної привабливості, без врахування технічних параметрів мережі, а подальше неконтрольоване зростання їх потужностей створює ризики для нормального функціонування енергосистеми країни. Пріоритетність такого тарифного регулювання, яке фактично започаткувало еру інтенсивного розвитку відновлюваної енергетики, вичерпало свій потенціал та потребує заміни на інші механізми державного регулювання.

Аукціони з розподілу квот підтримки

Тому з метою стимулювання розвитку ВДЕ з урахуванням ринкових механізмів ціноутворення та потреб енергосистеми Верховна Рада ухвалила Закон України від 25.04.2019 р. № 2712-VIII "Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії", в якому впровадила аукціон з розподілу квоти підтримки. Відповідно до цього Закону, для набуття права на підтримку в аукціонах зобов'язані брати участь об'єкти, що виробляють електричну енергію з енергії вітру (крім об'єктів з трьома вітротурбінами незалежно від встановленої потужності таких вітротурбін) більше 5 МВт та об'єкти, що виробляють електричну енергію з енергії сонця більше 1 МВт. Інші виробники електричної енергії з альтернативних джерел енергії можуть брати участь в аукціонах на добровільних засадах [9].

Державне підприємство "Прозорро.Продажі" відповідає за підтримку ефективної роботи електронної системи проведення аукціонів. Спочатку ДП "Гарантований покупець" встановлює квоту на підтримку певного виду альтернативної енергії, а також визначає дату, час та термін подачі заявок на участь в аукціоні. Виробники електроенергії, які бажають взяти участь, повинні подати заявку та кваліфікаційні документи, в яких зазначається їх цінова пропозиція та потужність. Аукціон проводиться виключно в електронній системі "Прозорро.Продажі" в зазначений день та час. Учасники мають можливість ознайомитися з інформацією про аукціон протягом 10 хвилин з моменту його активації та зменшити свою цінову пропозицію, але потужність не можна змінювати. Учасники, які запропонували найменші цінові пропозиції у межах квоти відповідної технології відновлюваної енергетики, визнаються переможцями аукціону на заявлену ними величину потужності.

В грудні 2020 року Міністерство енергетики України представило обсяги та параметри річної квоти підтримки, графік проведення аукціонів на 2021 рік, а також індикативні прогностичні показники річних квот підтримки на 2022-2025 роки (рис. 3). Але проблемою таких аукціонів є складність розрахунку необхідної потужності та визначення місць для їх встановлення. Наразі відсутні публічно доступні розрахунки, що показують вплив об'ємів квот на технічний та фінансовий стан енергетичного ринку. Міненерго взяло за основу пропозиції Держенергоефективності, але Оператор системи передачі пропонував взагалі не проводити аукціони для сонячних та вітрових електростанцій у найближчі 2 роки. Це аргументувалося проблемами з балансуванням енергомережі.

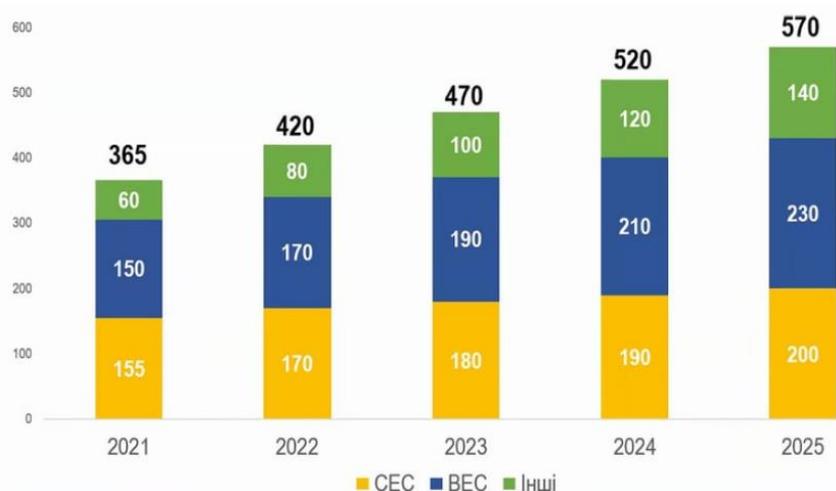


Рисунок 3 – Річна квота підтримки на 2021 рік та індикативні прогностичні показники на 2022-2025 роки [10]

Аукціони мають ключову перевагу перед "зеленим" тарифом - створення конкурентного середовища між учасниками ринку відновлюваної енергетики. Конкуренція сприяє визначенню ринкової ціни на електроенергію з ВДЕ, яка є вигідною для кінцевих споживачів та держави в цілому. Це дозволяє розвивати галузь та забезпечувати баланс інтересів ринку "зеленої" енергетики. Аукціони є гнучким механізмом, який можна адаптувати до потреб енергетичного ринку в конкретний період. Квоти можуть бути розподілені за регіонами, що стимулює розвиток генеруючих потужностей "зеленої" енергетики в областях з недостатньою потужністю або регулює розподіл потужностей бажаних для держави технологій відновлюваної енергетики в межах загальної квоти. Важливо зазначити, що квоти повинні розраховуватися з урахуванням плану розвитку відновлюваної енергетики відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 року, динаміки реалізації нових об'єктів, а також фактичного стану енергосистеми та її спроможності до інтеграції нових джерел ВДЕ [11].

Аукціони з продажу електроенергії з ВДЕ

Перший аукціон з продажу електроенергії, отриманої з ВДЕ, відбувся 5 жовтня 2020 року. Такі аукціони використовують двосторонні договори та базуються на підвищенні ціни. Це дозволяє учасникам ринку визначити, за якою ціною вони хочуть купувати електроенергію. Наразі ДП "Гарантований покупець" диверсифікує продукцію та пропонує різні лоти електроенергії з окремими часовими розкладами для збереження високого рівня зацікавленості учасників. Дана стратегія спрямована на максимізацію прибутку, що дозволяє досягати стабільно високих результатів на торгах. Ціна на електроенергію в результаті конкуренції може збільшуватись до 60%.

Також, укладення двосторонніх договорів сприяє зменшенню небалансів підприємства та отриманню додаткового доходу. Обсяги електроенергії, які раніше відправлялися на балансуєчий ринок, тепер виставляються на аукціон, що дозволяє підприємству отримувати більший виторг, а не мінімальний, який був на балансуєчому ринку. Виручені кошти невідкладно спрямовуються на розрахунки за "зеленим" тарифом [12]. За січень та лютий 2023р. було проведено 22 аукціони, результати торгів показано на рис. 4.

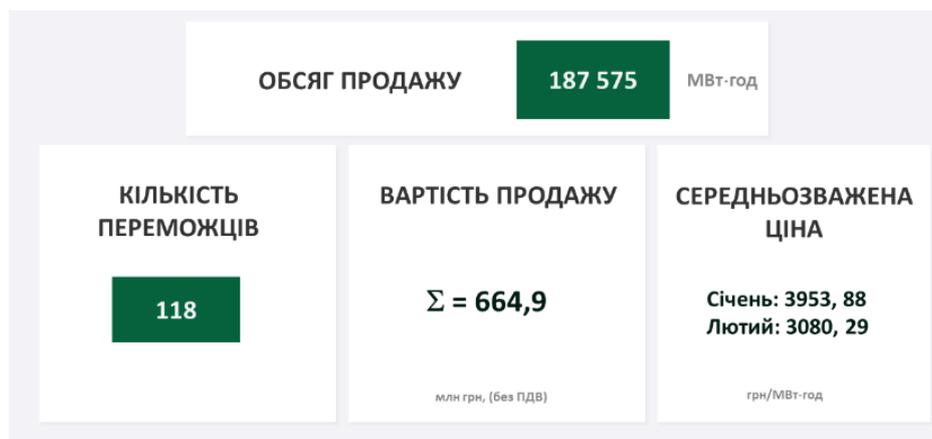


Рисунок 4 – Результати торгів "зелених" аукціонів за період 04.01.23-28.02.23[12]

Прямі договори купівлі-продажу енергії (CPPAs)

CPPAs є ще одним механізмом фінансування розвитку проектів ВДЕ. Зміст полягає в тому, що корпорації укладають угоди про закупівлю відновлюваної енергетики, щоб досягти своїх цілей сталого розвитку та уникнути непередбачуваних коливань цін, які можуть виникнути на первинні джерела енергії. Прямі договори купівлі-продажу енергії також прискорюють розгортання проектів у сфері відновлюваної енергетики, забезпечуючи потік доходів від виробленої електроенергії та полегшуючи доступ до проектного фінансування. Для виробників електроенергії з ВДЕ CPPAs надають доступ до корпоративних покупців як альтернативі державним аукціонам. Основні можливості і загрози прямих договорів наведено у табл. 1.

Загальний обсяг CPPAs у світі, укладених за перші три квартали 2022 року, становив 33 ГВт, що на 7% перевищує загальний обсяг, зафіксований у 2021 році. Лише у третьому кварталі 2022 року було оголошено про укладення понад 9 ГВт нових контрактів. На Північну Америку припадає близько 40% світових корпоративних договорів про розподіл електроенергії, за нею слідує Азійсько-Тихоокеанський регіон (близько 37%). Причому США, Індія і Тайвань входять до трійки найбільших ринків, на які припадає дві третини від загальної кількості законтракованих потужностей [13]. При вході на український ринок багато іноземних компаній матимуть на меті продовжувати політику та стратегії розвитку, заснованих на принципах соціальної відповідальності, збереження навколишнього середовища та зменшення свого вуглецевого сліду. Використання зеленої електроенергії в повсякденній діяльності таких корпорацій стало тенденцією. Тому для розвитку не тільки відновлюваної енергетики, а й економіки в цілому, необхідно усунути регуляторні перешкоди для укладання CPPAs.

В цьому сегменті перспективним також є формування груп споживачів або цільових груп, на які будуть спрямовані державні програми та заходи щодо переходу на використання електроенергії з відновлюваних джерел. Однією з основних причин, яка зумовлює створення цільової групи, є географічне розташування споживачів. Тобто регіони з більш відповідними кліматичними умовами та наявністю ресурсів: сонячної енергії, вітру чи гідроенергії, можуть стати пріоритетними для споживання електроенергії з ВДЕ.

Державне стимулювання також може пропонувати податкові знижки та інші фінансові стимули для цільової групи споживачів електроенергії з ВДЕ, наприклад:

1. Податкові кредити або податкові знижки. Держава може надавати пільги на оподаткування товарів та послуг, що виробляються за допомогою ВДЕ. Це може зменшити витрати для таких споживачів та підвищити їхню конкурентоспроможність.

2. Державні гранти. Вони можуть надаватися як фінансова допомога для встановлення ВДЕ на підприємствах, а також для впровадження енергоефективних технологій. Це може допомогти зменшити витрати на встановлення ВДЕ та стимулювати їх використання безпосередньо в точці споживання.

3. Субсидії на електроенергію. Держава може надавати споживачам електроенергії з ВДЕ знижки на тарифи, щоб зменшити витрати на енергію. Це може зробити електроенергію з ВДЕ більш доступною та привабливою для споживачів.

Таблиця 1 — Основні можливості та загрози *CPAs*

	Корпоративний споживач	Виробник електроенергії з ВДЕ
Можливості	<p>1. Фіксована/мінімальна/обмежена ціна на електроенергію - захист від зростання або коливання цін на енергію на оптових ринках.</p> <p>2. Досягнення цілей сталого розвитку та забезпечення 100% попиту на електроенергію з відновлюваних джерел. Це стало настільки ж важливим, якщо не більш важливим, ніж економічні чинники.</p> <p>3. Невеликі корпорації можуть об'єднуватися, щоб розділити ризики та посилити свої позиції на переговорах.</p> <p>4. Блокчейн-договори купівлі-продажу електроенергії як простіший спосіб об'єднати попит з іншими корпораціями та вийти на ринок.</p> <p>5. Поява нових технологій, що дозволяють купувати відновлювану енергію в режимі 24/7.</p>	<p>1. Виробник може досягти стабільної ціни в довгостроковій перспективі, оскільки компанія часто має більше бажання страхуватися від зростання/коливання цін на електроенергію. Це особливо привабливо для проєктів, що фінансуються за рахунок інвестиційних фондів та проєктного фінансування.</p> <p>2. У короткостроковій перспективі підприємства іноді готові платити вищу ціну, ніж оптова ціна (розраховуючи на те, що це окупиться в довгостроковій перспективі, коли ціни зростуть, а підприємства все ще матимуть вигоду від фіксованої ціни).</p> <p>3. Поступове припинення субсидування відновлюваної енергетики означає, що корпоративні <i>PPAs</i> пропонують новий шлях на ринок для виробників.</p> <p>4. Блокчейн-договори купівлі-продажу електроенергії як простіший спосіб узгодити генерацію з корпоративним попитом та отримати доступ до вищих тарифів.</p>
Загрози	<p>1. Економічні вигоди накопичуються лише тоді, коли правління корпорації довіряє прогнозам цін на електроенергію. Рада директорів часто не бажає платити більше в короткостроковій перспективі за нижчі ціни в довгостроковій перспективі.</p> <p>2. Складність/витрати при укладанні контрактів, оскільки купівля електроенергії не є основним бізнесом. Це є перешкодою особливо для малих і середніх підприємств.</p> <p>3. Через стохастичний характер ВДЕ розподіл обсягу та формування ризику є ключовим питанням та може вплинути на рівень цінової визначеності, що досягається.</p> <p>4. Зміна законодавства може вплинути на комерційний баланс угоди та спричинити перегляд переговорів.</p>	<p>1. Ціна, яку компанія готова заплатити/встановити мінімальну ціну, може бути недостатньою для фінансування проєкту.</p> <p>2. Кредитоспроможність/банкоспроможність покупця – більша проблема для несубсидованих <i>PPA</i> складатиме майже 100% від загального доходу проєкту.</p> <p>3. Купівля електроенергії не є основним бізнесом для корпорації: якщо оптові ціни на електроенергію знизяться, чи компанія оголосить дефолт, щоб купити вихід із невдалої угоди?</p> <p>4. Невідповідності між регуляторними режимами в різних державах-членах ЄС, що ускладнює досягнення масштабу між юрисдикціями з одним покупцем.</p> <p>5. Оптимізація структур і зберігання енергії.</p>

Контракти на різницю (*CfD*)

Деякі країни, зокрема Велика Британія, обрали основним механізмом субсидій для досягнення цілей з відновлюваної енергетики контракти на різницю. *CfD* гарантує власникам активів відновлюваної енергетики фіксовану ціну за вироблену електроенергію протягом фіксованого терміну дії контракту. *CfD* зазвичай застосовують в аукціонній системі підтримки, а їх суть полягає в наступному: виробники ВДЕ укладають договір з державною компанією про гарантовану максимальну ціну за кожен кіловат-годину електроенергії, яку вони виробляють. Далі виробники продають електроенергію на ринку електроенергії, але якщо ринкова ціна падає нижче гарантованої ціни, державне підприємство компенсує виробнику ВДЕ

різницю. І навпаки, якщо ринкова ціна перевищує гарантовану, виробники ВДЕ компенсують державному підприємству різницю (рис. 5).



Рисунок 5 – Схема функціонування CfD

Таким чином контракти значною мірою стимулюють інвестиції в проекти відновлюваної енергетики, захищаючи розробників від нестабільних оптових цін. Забезпечення впевненості в доходах допомагає зменшити ризики проектів відновлюваної енергетики, таким чином зменшуючи витрати на залучення капіталу та підвищуючи економічну життєздатність проектів відновлюваної енергетики. Однак, цей механізм також має свої недоліки та може бути критикований за те, що він не стимулює конкуренцію між виробниками ВДЕ. Крім того, державне підприємство, яке компенсує виробникам різницю у випадку падіння ринкової ціни, може потрапити в фінансову складність у разі, якщо ціна буде падати тривалий час. Тому такий механізм може розглядатися лише для перехідного етапу на інші методи стимулювання.

Feed-in premium (FIP)

Використання механізму "зелених" аукціонів та прямих договорів купівлі-продажу енергії не підходить для малих ВДЕ, за рахунок яких і можлива децентралізація енергетичної системи. Тому необхідно розглядати можливість відходу від системи сталого тарифу та запровадження схеми, подібної до FIP. Згідно зі схемою FIP, електроенергія з ВДЕ безпосередньо продається на ринку електроенергії виробниками, а вони в свою чергу отримують премію на додачу до ринкової ціни електроенергії. FIP може бути фіксованим (тобто на постійному рівні незалежно від ринкових цін) або змінним (тобто зі змінними рівнями залежно від зміни ринкових цін). Фіксовані FIP є простішими за структурою, але існує ризик надмірної компенсації у випадку високих ринкових цін і недостатньої компенсації у випадку низьких ринкових цін. Тому фіксований FIP зазвичай поєднується із заздалегідь визначеними мінімальним і максимальним рівнями або для FIP, або для загальної винагороди (FIP + ринкова ціна). Змінні FIP розраховуються на безперервній основі як різниця між ринковими цінами і попередньо визначеним базовим рівнем тарифу. Якщо ринкові ціни вищі за базовий рівень тарифу, FIP не сплачується. У деяких випадках існує також мінімальна ринкова ціна, яка використовується для розрахунку FIP, щоб підвищити чутливість операторів ВДЕ до ринкових цін і зменшити витрати на схему підтримки ВДЕ у разі низьких або навіть негативних ринкових цін [14].

FIP можна диференціювати відповідно до технологій, розміру та розташування, подібно до квот. Тобто врахувати план розвитку відновлюваної енергетики, динаміку реалізації нових об'єктів та фактичний стан енергосистеми. FIP створює стимул для операторів ВДЕ реагувати на цінні сигнали ринку електроенергії, тобто виробляти електроенергію, коли попит високий та/або виробництво з інших джерел енергії низьке. Вони також заохочують інвесторів ВДЕ враховувати очікувані схеми навантаження при розробці проекту ВДЕ (наприклад, вибір місця та типу турбіни для вітрових парків, орієнтація фотоелектричних модулів). Таким чином, FIP сприяє більшій інтеграції ВДЕ в ринок електроенергії, що призводить до більш ефективного поєднання постачання електроенергії з попитом. Це стає все більш важливим із зростанням частки відновлюваної енергії у виробництві електроенергії.

Мінімальні рівні для фіксованого FIP або для загальної винагороди (FIP + ринкова ціна) можуть зменшити ризик ринкової ціни для інвесторів ВДЕ та забезпечити гарантію щодо мінімальних доходів, які можна очікувати. Це також стосується змінних схем FIP, де інвесторам ВДЕ гарантується заздалегідь визначений базовий тариф, подібний до "зеленого" тарифу.

Також є можливість виплачувати додаткові технологічні бонуси на додачу до FIP. Ця винагорода за управління виплачується для покриття додаткових витрат оператора ВДЕ, пов'язаних із прямим

продажом електроенергії на спотовому ринку (вартість послуг з балансування та адміністративні витрати при торгівлі електроенергією). Також можливий механізм зниження рівня FIP або максимального рівня винагороди.

Надання послуг

Із прийняттям Закону України від 15.02.2022 р. № 2046-IX “Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії” було врегульовано питання можливості використання системи накопичення енергії (EES) споживачами [15]. Тому з’являються додаткові механізми стимулювання розвитку відновлюваної енергетики шляхом залучення виробників з ВДЕ до надання послуг балансування та допоміжних послуг на ринку електричної енергії, наприклад: врегулювання небалансів на ринку електричної енергії, стабілізація частоти, компенсація напруги, запобігання зворотному перетоку, покращення гнучкості системи та підвищення ефективності системи.

Розглянемо ці послуги детальніше. Для стабілізації частоти потрібна енергія, яка подається в мережу або відбирається з неї для регулювання частоти системи. Ця послуга вимагає швидкого реагування, яке може відбуватися протягом декількох секунд і тривати кілька хвилин. Для цього ESS вимагає швидкого часу відгуку, високої продуктивності та великої потужності. Стабілізація частоти особливо важлива для мікромереж або ізовольованих електромереж, де більш потужна енергосистема не керує їхньою системою. Таким чином, коли є невідповідність між виробництвом електроенергії та попитом на неї, ESS повинна регулювати частоту системи та підтримувати стабільність системи [16].

Зі все більшою інтеграцією ВДЕ в сучасну енергосистему розподільна мережа стала активною мережею, де напруга на шинах при інтеграції ВДЕ може бути вищою, ніж на інших шинах, розташованих вище за топологією. Це порушило традиційні методи регулювання напруги, такі як використання пристроїв регулювання під навантаженням та перемикачів без збудження. Традиційний метод зазвичай підвищує рівень напруги на виході з електромережі, що, в свою чергу, вирівнює напругу всього фідера розподільчої мережі. Проте, з впровадженням ВДЕ в систему, регулювання напруги в одному вузлі може призвести до порушення напруги в іншому вузлі системи. Залучивши власників ВДЕ з системами накопичення енергії до регулювання напруги, підвищується показник якості електричної енергії та з’являється механізм для фінансового стимулювання розвитку відновлюваної енергетики.

Зворотне перетікання потужності в електромережі відоме як потік електроенергії у зворотному напрямку від типового потоку потужності. Загальноприйнятою практикою запобігання зворотному потоку електроенергії через надлишок енергії ВДЕ було їх встановлення потужністю меншого розміру, ніж місцеве навантаження системи, що гарантувало, що виробництво з ВДЕ завжди буде меншим, ніж попит на енергію. Тим не менш, ці рішення обмежують зростання ВДЕ, призводять до неефективного використання енергії та не гарантують енергетичну безпеку. Тому ESS використовується для досягнення високого власного споживання енергії ВДЕ та мінімізації надлишку виробництва ВДЕ.

ESS можуть згладити типову переривчасту (і, отже, невизначену) віддачу енергії, яку виробляють ВДЕ, шляхом зарядки в періоди низького попиту на електроенергію та розрядки під час піку високого попиту. А поява інтелектуальних мережевих технологій надає широкі можливості для покращення роботи мережі за рахунок збільшення двонаправленого потоку інформації між сторонами, що знаходяться на різних рівнях ієрархії. Тому власників ВДЕ можна залучати до врегулювання небалансів на ринку електричної енергії.

Висновки

Стимулювання розвитку відновлюваної енергетики є одним з пріоритетних напрямів державної політики України у сфері електроенергетики. Наразі будівництво установок ВДЕ відбувається виключно з позиції комерційної привабливості, без врахування технічних параметрів мережі, а подальше неконтрольоване зростання їх потужностей створює ризики для нормального функціонування енергосистеми країни. Тому регуляторні органи повинні вжити необхідних заходів для забезпечення стабільного розвитку відновлюваної енергетики.

Механізми стимулювання повинні реалізуватися в ринковий спосіб без втручання в господарську діяльність суб’єктів та з максимальною користю для енергосистеми. До цих механізмів можна віднести аукціони з розподілу квот підтримки та з продажу електроенергії з ВДЕ; прямі договори купівлі-продажу енергії; контракти на різницю; «зелені» надбавки; надання послуг балансування та допоміжних послуг.

В переліку механізмів наведено лише основні варіанти стимулювання, адже вони можуть відрізнятися в залежності від конкретних умов та потреб країни. Однак, наведені вище механізми є добре відомими і часто використовуються урядами в усьому світі для сприяння переходу до стійкого енергетичного майбутнього та посилення енергетичної незалежності.

Кожний з перерахованих механізмів має свою складову впливу на контрольований та стабільний розвиток відновлюваної енергетики. А використання різних варіацій механізмів державного стимулювання розвитку ВДЕ є важливим, оскільки це дозволить забезпечити ефективність і стійкість програми підтримки ВДЕ; сприяти розвитку технологій; знизити ризики залежності та негативні наслідки від функціонування лише одного чи декількох механізмів.

Результати дослідження будуть використані для вирішення питання присудження ВДЕ, при якому механізми стимулювання відновлюваної енергетики будуть враховувати схеми, параметри системи в точці присудження та прогнозування наслідків.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (дата звернення: 12.12.2022).
2. Герман Галушенко: Прискорення зеленого переходу – питання національної безпеки України. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/herman-halushchenko-pryskorennia-zelenoho-perekhodu-pytannia-natsionalnoi-bezpeky-ukrainy> (дата звернення: 01.04.2023).
3. Омельченко В. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny> (дата звернення: 11.02.2023).
4. Степаненко В.А., Замулко А.І., Веремійчук Ю.А., Находов В.Ф.. Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання / Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 2. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372>.
5. У 2020 році встановлена потужність ВЕС та СЕС зросла на 41%, а їхня частка у структурі виробництва електроенергії – вдвічі. ПрАТ "НЕК "Укренерго. URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnnytstva-elektroenergiyi-vidvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXpN3Ah-MC-NwQYS9_OkIBvg (дата звернення: 14.05.2022).
6. Про засади державної регуляторної політики у сфері господарської діяльності : Закон України від 11.09.2003 р. № 1160-IV : станом на 31 березня 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1160-15#Text> (дата звернення: 02.04.2023).
7. Про внесення змін до деяких законів України щодо встановлення "зеленого" тарифу : Закон України від 25.09.2008 р. № 601-VI : станом на 1 лип. 2019 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/601-17#Text> (дата звернення: 31.03.2023).
8. Коберник В.С. Розвиток відновлюваних джерел енергії в світі на сучасному етапі. In The 4 th International scientific and practical conference - Modern research in world science. Lviv, Ukraine. 2022.
9. Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії : Закон України від 25.04.2019 р. № 2712-VIII : станом на 16 черв. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19#Text> (дата звернення: 02.04.2023).
10. Міністерство енергетики представило квоти підтримки до 2025 року та графік проведення “зелених” аукціонів. УВЕА. URL: <http://uwea.com.ua/ua/news/entry/ministerstvo-energetiki-ukrainy-predstavilo-kvoty-podderzhki-k-2025-godu-i/> (дата звернення: 04.04.2023)
11. Курбатова Т.О., Трипольська Г.С., Письменна У.С., Гирченко Є.В., Романюк Я.С.. Механізм «зелених» аукціонів для управління розвитком відновлюваної енергетики: передумови впровадження та особливості функціонування в Україні / Державне управління: удосконалення та розвиток. 2021. № 10. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.10.30>.
12. За січень та лютий 2023 року держпідприємство провело 22 аукціони. ДП «Гарантований покупець». URL: https://www.gpee.com.ua/news_item/1155 (дата звернення: 13.04.2023).
13. Chauhan A. Global corporate clean energy procurement deals of 33 GW announced in the first three quarters of 2022. IHS Markit. URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/research-analysis/global-corporate-clean-energy-procurement-deals-of-33-gw.html> (дата звернення: 21.01.2023).
14. Xydis G., Vlachakis N. Feed-in-Premium Renewable Energy Support Scheme: A Scenario Approach. Resources. 2019. Т. 8, № 2. С. 106. URL: <https://doi.org/10.3390/resources8020106> (дата звернення: 31.03.2023).
15. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії : Закон України від 15.02.2022 р. № 2046-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#Text> (дата звернення: 03.04.2023).
16. Tianmei Chen, Yi Jin, Hanyu Lv, Antao Yang, Meiyi Liu, Bing Chen, Ying Xie, Qiang Chen, Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems, Transactions of Tianjin University 26 (3) (2020) 208–217.

V. Stepanenko¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-6176-589X

A. Zamulko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8018-6332

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

MECHANISMS OF STATE STIMULATION FOR RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT

The paper is devoted to the analysis of directions for stimulating the development and attracting investment in the renewable energy sector of Ukraine. For the energy sector during the recovery period, the development of renewable energy sources will be fundamental. The problems associated with this development can be divided into such groups as: the formation of mechanisms that will ensure controlled, efficient development; and technical connection issues.

Currently, a wide range of strategies is being applied in different countries. However, which of the various instruments is the most effective and efficient for increasing the share of RES is still a topic of research. They

should be implemented in a market-based manner without interfering with the economic activities of entities and with maximum benefit to the power system.

At present, the construction of renewable energy facilities is carried out at the expense of the feed-in tariff and solely from the standpoint of commercial attractiveness, without considering the technical parameters of the grid, and further uncontrolled growth of their capacities poses risks to the normal functioning of the country's energy system. The priority of such tariff regulation, which actually launched the era of intensive development of renewable energy, has exhausted its potential and needs to be replaced by other mechanisms of state regulation.

Incentive mechanisms should be implemented in a market-based manner without interfering with the economic activities of entities and with maximum benefit to the energy system. These mechanisms include auctions for the distribution of support quotas and for the sale of electricity from RES; corporate power purchase agreement; contracts for difference; feed-in premium; provision of balancing and ancillary services.

Each of these mechanisms has its own component of influence on the controlled and stable development of renewable energy. Therefore, it is necessary to use a combination of these incentive mechanisms that can be adjusted in accordance with the current state of the power system at any long-term point in time.

Keywords: renewable energy sources, auctions for the allocation of support quotas, auctions for the sale of electricity, feed-in premium, corporate power purchase agreements, contracts for difference.

References

1. On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness": Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 18.08.2017 No. 605-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (date of access: 12.12.2022).
2. Herman Halushchenko: Accelerating the green transition is a matter of national security for Ukraine. Government portal. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/herman-halushchenko-pryskorennia-zelenoho-perekhodu-pytannia-natsionalnoi-bezpeky-ukrainy> (date of access: 01.04.2023).
3. V. Omelchenko. "Renewable Energy Sector of Ukraine before, during and after the war". Razumkov Center. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislyva-viyny> (date of access: 11.02.2023).
4. V. Stepanenko, A. Zamulko, Y. Veremiichuk, V. Nakhodov. Assessment of risk for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. "POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology". 2022. No 2. P. 64-74. ISSN 1813-5420. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372>.
5. In 2020, the installed capacity of WPPs and SES increased by 41%, and their share in the structure of electricity production - doubled. Ukrenergo National Energy Company. URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXPn3Ah-MC-NwQYS9_OkIBvg (date of access: 14.05.2022).
6. On the Principles of the State Regulatory Policy in Economic Activity: Law of Ukraine of 11.09.2003 p. № 1160-IV: as of March 31, 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1160-15#Text> (date of access: 02.04.2023).
7. On Amendments to Certain Laws of Ukraine on the Establishment of a Green Tariff: Law of Ukraine of 25.09.2008 No. 601-VI: as of July 1, 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/601-17#Text> (date of access: 31.03.2023).
8. V. Kobernyk. Development of renewable energy sources in the world at the present stage. In The 4 th International scientific and practical conference - Modern research in world science. Lviv, Ukraine. 2022.
9. On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Ensuring Competitive Conditions for the Production of Electricity from Alternative Energy Sources: Law of Ukraine of 25.04.2019 No. 2712-VIII: as of June 16. 2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19#Text> (date of access: 02.04.2023).
10. Ministry of Energy of Ukraine announced green auctions quotas for 2021-2025. UWEA. URL: <http://uwea.com.ua/ua/news/entry/ministerstvo-energetiki-ukrainy-predstavilo-kvoty-podderzhki-k-2025-godu-i/> (date of access: 04.04.2023)
11. T. Kurbatova, H. Trypolska, U. Pysmenna, E. Girchenko, Y. Romaniuk. The mechanism of "green" auctions for managing the development of renewable energy: prerequisites for implementation and features of functioning in Ukraine / Public administration: improvement and development. 2021. № 10. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.10.30>.
12. In January and February 2023, the State Enterprise held 22 auctions. State Enterprise "Guaranteed Buyer". URL: https://www.gpee.com.ua/news_item/1155 (date of access: 13.04.2023).
13. Chauhan A. Global corporate clean energy procurement deals of 33 GW announced in the first three quarters of 2022. IHS Markit. URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/research-analysis/global-corporate-clean-energy-procurement-deals-of-33-gw.html> (date of access: 21.01.2023).
14. Xydis G., Vlachakis N. Feed-in-Premium Renewable Energy Support Scheme: A Scenario Approach. Resources. 2019. T. 8, № 2. C. 106. URL: <https://doi.org/10.3390/resources8020106> (date of access: 31.03.2023).
15. On Amendments to Certain Laws of Ukraine on the Development of Energy Storage Facilities: Law of Ukraine of 15.02.2022 p. № 2046-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#Text> (date of access: 03.04.2023).
16. Tianmei Chen, Yi Jin, Hanyu Lv, Antao Yang, Meiyi Liu, Bing Chen, Ying Xie, Qiang Chen, Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems, Transactions of Tianjin University 26 (3) (2020) 208–217.

Надійшла: 30.04.2023

Received: 30.04.2023

А.В. Торопов¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-8505-0266Л.К. Лістовщик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3413-1802Л.В. Торопова¹, асистент, ORCID 0000-0001-6882-2295О.М. Терентьєв¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2523-2804¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІРТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ «АСИНХРОННИЙ ДВИГУН - ПРИСТРІЙ ПЛАВНОГО ПУСКУ ІЗ ДВОМА РЕГУЛЬОВАНИМИ ФАЗАМИ»

Одним з найчастіше використовуваних способів пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором є запуск шляхом плавного підвищення напруги живлення. При цьому використовуються пристрої плавного пуску на основі тиристорів або симисторів, що значно дешевші перетворювачів частоти на основі IGBT – транзисторів. В свою чергу, недоліком такого способу пуску є зменшення пускового моменту, тому можливість використання таких пускачів для різних виконавчих механізмів потребує ретельного дослідження. При наявності обмеження потужності джерела живлення, особливо в умовах військового часу питання обмеження пускових струмів, особливо у випадку використання пускачів з двома регульованими фазами, є актуальним. Для врахування кратності пускових струмів для різних типів механізмів створена математична модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома керованими фазами». Модель відрізняється від відомих можливістю обмеження потужності мережі живлення, вигляду механічної характеристики виконавчого механізму та пускового моменту при лінійній зміні напруги. Перехідні процеси представляються у відносних одиницях для можливості оцінки кратності пускових струмів для визначення необхідної потужності автономного джерела живлення. Для оцінки адекватності математичної моделі був створений дослідницький стенд із вимірюванням струмів в обмотці двигуна за допомогою трансформатора струму та мікропроцесорного пристрою із функцією осцилографування. В роботі здійснено порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних досліджень на фізичній моделі, при цьому розбіжність результатів не перевищувала 10%. Визначено, що при використанні пристрою плавного пуску із двома регульованими фазами навіть при незначних навантаженнях кратність струмів є досить високою і потребує використання джерела живлення більшої потужності, але меншої, ніж у випадку прямого пуску. Сформульовані висновки по результатам дослідження та рекомендації щодо подальшого зменшення пускових струмів.

Ключові слова: пристрій плавного пуску, лінійна зміна напруги, математична модель, обмеження потужності, керування тиристорами

Вступ. В сучасних умовах воєнного стану на виробництві все частіше виникає проблема обмеження електропостачання. Для забезпечення безперервності технологічного процесу або підтримання системи у стані очікування найбільш важливі вузли при зникненні основного живлення запускають від автономних генераторів електричної енергії. Проблемою такого підходу є те, що такі генератори мають низьку перевантажувальну здатність і для запуску асинхронних двигунів вентиляторів, компресорів та інших механізмів, необхідно використовувати генератори більшої потужності, ніж це потрібно для роботи в стаціонарному режимі. Зменшення навантаження на дизельні та бензинові генератори під час пуску механізмів із асинхронними двигунами є використання напівпровідникових пускачів та регуляторів швидкості. У випадку використання регуляторів швидкості на основі перетворювачів частоти пускові струми обмежуються допустимим значенням струму перетворювача і лежить в межах 110..150 % від номінального значення [1]. В той же час вартість перетворювача частоти є співрозмірною із вартістю генератора і його варто використовувати в установках із підвищеними вимогами до запуску, коли неспрацювання системи пуску може призвести до великих економічних збитків [2].

Іншим підходом до обмеження пускових струмів під час розгону асинхронних двигунів є використання напівпровідникових пристроїв плавного пуску на основі тиристорів [3,4]. Для середніх і великих потужностей ці пристрої значно дешевші ніж перетворювачі частоти аналогічної потужності [5]. Принцип дії цих пускачів зумовлює зміну лише напруги живлення обмоток, що не дозволяє керувати електромагнітним моментом двигуна з високою точністю [6].

Пристрої плавного пуску відрізняються як за схемними рішеннями [7], так і програмним функціоналом [1]. Основною характеристикою, що впливає як на вартість цих пристроїв, так і на можливість їх застосування, є кількість регульованих фаз при живленні асинхронного двигуна. При використанні тиристорів лише у двох фазах вартість пускача суттєво зменшується, проте це, в свою чергу,

приводить до неможливості точного керування струмом двигуна та забезпечення достатнього крутного моменту при пуску навіть для невеликих навантажень. Можливість використання таких напівпровідникових пускачів для більшості механізмів в умовах обмеження потужності системи електропостачання потребує докладного аналізу. При цьому використання формули для визначення пускового моменту асинхронного двигуна, що виводиться на основі схеми заміщення фази двигуна неможливе внаслідок нерівності фазових напруг, що прикладаються до кожної з обмоток в довільний момент часу[8]:

$$M_n = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_c [(R_1 + R_2')^2 + X_K^2]} \quad (1)$$

де U_1 - напруга живлення обмоток двигуна, R_1, R_2' - активний опір статора і приведений активний опір ротора, відповідно, X_K - сумарний індуктивний опір.

Для аналізу можливості використання пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами необхідно використовувати уточнену математичну модель, що враховує динамічні характеристики системи при живленні обмоток двигуна несинусоїдальною напругою. При цьому доцільно використовувати прикладне програмне забезпечення, що є загально –доступним і інтуїтивно зрозумілим для користувачів.

Мета та завдання дослідження. Розробити математичну модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома регульованими фазами» в програмному забезпеченні MATLAB Simulink із врахуванням можливості вибору потужності джерела живлення, а також характеристики виконавчого механізму.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

1. Шляхом використання готових блоків додатку Simulink середовища MATLAB розробити схему силової частини системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску» із живленням від джерела живлення обмеженої потужності.

2. Розробити схему вмикання тиристорів для двофазної схеми керування пристроєм плавного пуску із вмиканням тиристорів при напруги переході через нуль.

3. Для визначення та аналізу перевантажень двигуна розробити функціональний блок обчислення середнього значення струму під час пуску.

Матеріал і результати дослідження. В якості основи моделі в MATLAB Simulink використані функціональні блоки бібліотеки PowerSims. Наразі існує велика кількість моделей для пристроїв плавного пуску із трьома регульованими фазами саме із використанням цих блоків. При цьому є можливість дослідження як роботи пристроїв плавного пуску в режимі обмеження струму, й відповідно потужності [9]. Проте слід відзначити, що функція обмеження струму й, відповідно, моменту реалізована далеко не у всіх пристроях плавного пуску. В якості базового режиму роботи моделі доцільно досліджувати режим лінійного наростання напруги.

Запропонована уточнена математична модель, реалізована в програмному середовищі MATLAB Simulink, представлена на рисунку 1.

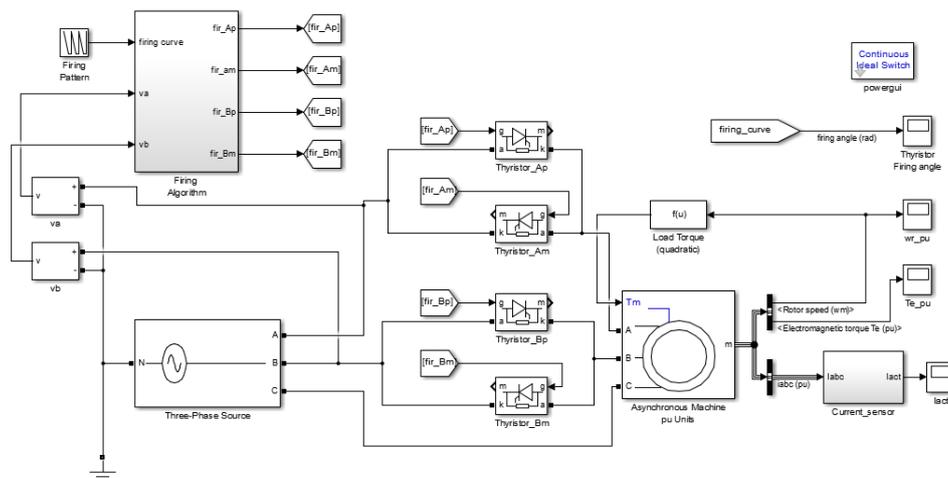


Рисунок 1. *Модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома регульованими фазами»*

В якості некерованої фази використовується фаза С (L3), тобто між генератором змінної напруги обмеженої потужності і однією з обмоток двигуна встановлена перемичка. Алгоритм вмикання тиристорів в керованих фазах реалізується в функціональному блоці Firing Algorithm і докладно описаний в роботі [9]. Особливістю блоку, представленого на рисунку 2, є те, що в якості вхідних сигналів він використовує лише напруги за керованими фазами. Алгоритм лінійної зміни напруги реалізований у функціональному блоці Firing pattern. В ньому задаються початковий кут відпирання, який визначає величину стартового моменту, і зміна кута від початкового до кінцевого значення. Також в блоці Firing Algorithm реалізовано функцію синхронізації по фазі напруги. Це забезпечує вмикання тиристорів про проходженні нуля, а не в довільний момент часу, як це реалізовано в сучасних пристроях плавного пуску.

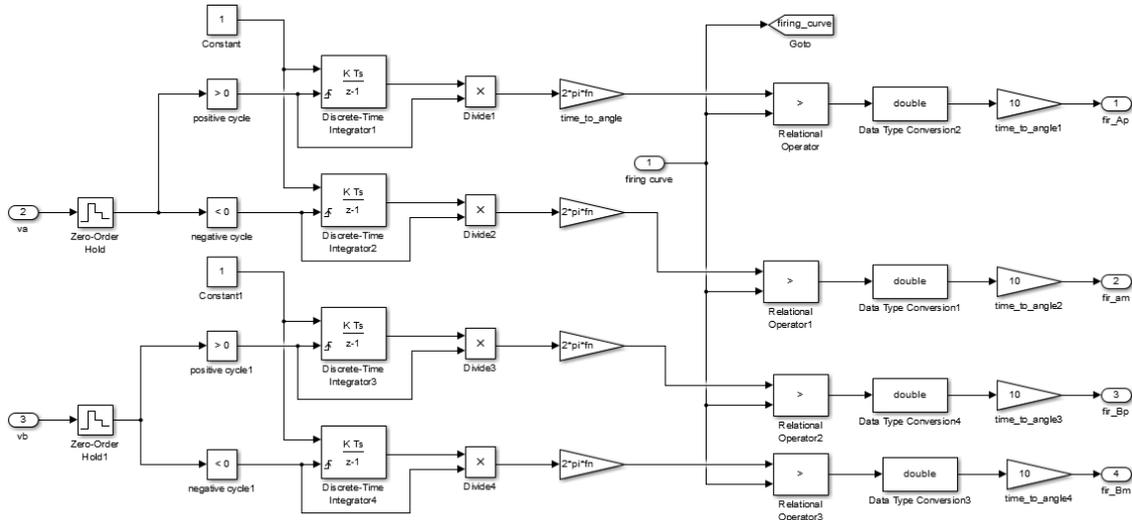


Рисунок 2. Функціональний блок вмикання тиристорів в керованих фазах

Визначимо перевантаження системи електропостачання за струмом при використанні пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами при запуску двигунів співвимірної потужності. В якості моделі виконавчого механізму прийнято квадратичний характер навантаження із великим моментом інерції, що відповідає роботі двигуна на відцентровий вентилятор. Навантаження формується в блоці Load torque (quadratic) в вигляді функції від відносного значення швидкості. При цьому використана модель асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором потужністю 7.5кВт, що може бути вибрана в налаштуваннях функціонального блоку Asynchronous_machine_pu_units. При використанні цього блоку графіки за швидкістю і струмом формуємо у відносних значеннях відносно номінальних. Перехідний процес за швидкістю при лінійній зміні напруги на виході пристрою плавного пуску має вигляд, представлений на рисунку 3.

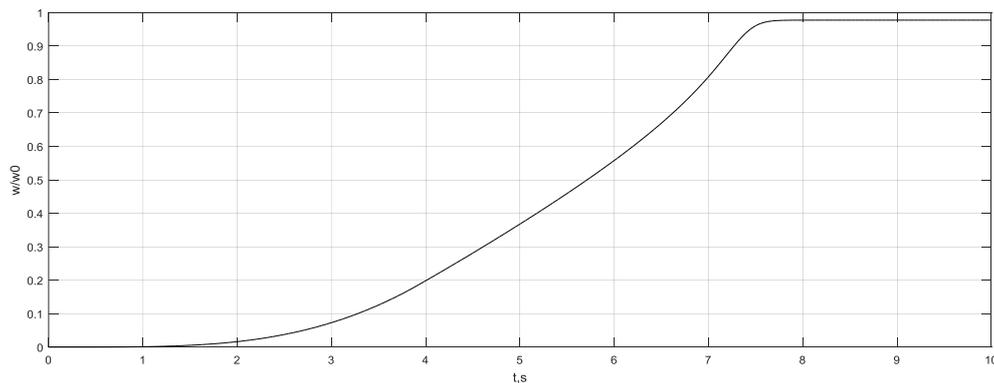


Рисунок 3. Графік зміни відносної швидкості при пуску двигуна шляхом лінійної зміни напруги

При квадратичному характері навантаження, вибраному в налаштуванні математичної моделі, з урахуванням (1) швидкість визначитиметься за виразом:

$$\omega = \sqrt{K_{вент} \cdot M_{нав}} \sim U, \quad (2)$$

де $K_{вент}$ - коефіцієнт впливу вентиляторної характеристики; $M_{нав}$ - момент навантаження.

При лінійній зміні напруги на обмотках двигуна, швидкість має змінюватися за законом, близьким до лінійного, що підтверджується результатами математичного моделювання.

Для оцінки перевантажень мережі живлення під час пуску використовується середнє арифметичне дійсних значень струмів по всіх трьох фазах. Розрахунок цього значення здійснюється в розробленій математичній моделі за допомогою блоку Current_sensor. Графік перехідного процесу по перевантаженню представлений на рисунку 4.

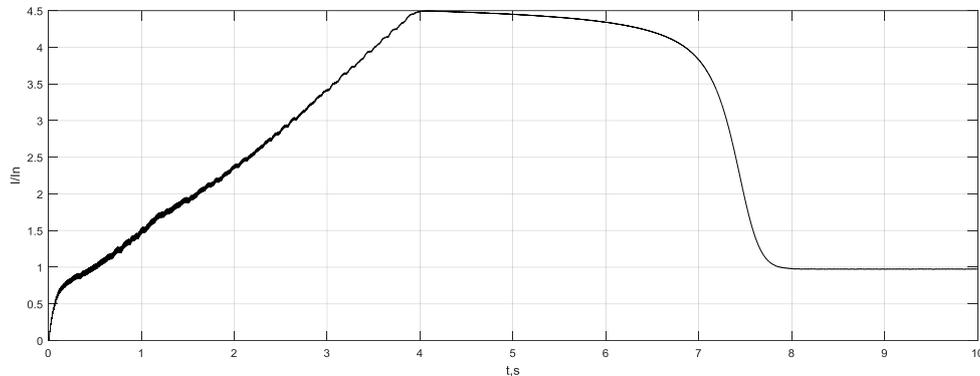


Рисунок 4. *Графік зміни середнього значення електроспоживання за струмом при пуску двигуна із вентиляторним навантаженням*

Можна побачити, що навіть для вентиляторного характеру навантаження, при якому пускові струму зазвичай є мінімальними [1], максимальна кратність струму під час розгону двигуна складає 4.5. Це, в свою чергу, приводить до необхідності використання автономних джерел живлення більшої потужності, оскільки їх перевантажувальна здатність зазвичай лежить в межах 120..150 %. При використанні пристрою плавного пуску із двома регульованими фазами для інших механізмів із більш важкими умовами пуску, кратність струму буде збільшуватись. Важливо відзначити, що внаслідок несинусоїдальності струмів в початковий момент пуску двигуна середнє значення струму в обмотках не дорівнює нулеві і призводить до нагріву двигуна ще до зрушення двигуна з місця.

Для оцінки відповідності запропонованої моделі реальному електроприводу порівняємо отримані результати математичного моделювання із натурними. Для отримання натурних характеристик був створений дослідницький стенд із пристроєм плавного пуску, асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором потужністю 7.5кВт и регульованим навантаженням для формування вентиляторних характеристик. В якості досліджуваного пристрою плавного пуску використаний пристрій ADXL від компанії Lovato electric із двома регульованими фазами. За замовчуванням для цього пристрою плавного пуску вибраний режим лінійного збільшення напруги. Особливістю налаштувань цього пристрою плавного пуску є те, що при перевищенні допустимого значення навантаження, він переходить в режим обмеження струму. При цьому він припиняє збільшувати напругу, що не враховується в розробленій математичній моделі в MATLAB. Для уникнення цього впливу на роботу системи режим обмеження був відключений і при перевищенні допустимого струму пристрій плавного пуску ADXL зупиняє двигун із індикацією помилки.

Спрощена схема дослідного стенду представлена на рисунку 5.

На схемі ТА – трансформатор струму із вбудованим перетворювачем сигналу 4...20 мА типу ССТ40-200, UZ – перетворювач типу Lenze 8400 Vector із вбудованою функцією осцилографування аналогового сигналу 4...20 мА, ПК – персональний комп'ютер із програмним забезпеченням L-force Engineer, у якому відображаються перехідний процес за струмом. Слід відзначити, що ця система має певну інерційність за рахунок використання трансформатора струму із перетворювачем 4...20 мА, однак вона дозволить порівняти кратність пускових струмів для математичної моделі і досліджуваної електромеханічної системи. Слід відзначити, що на трансформатор струму подає на вхід перетворювача Lenze 8400 Vector абсолютне значення струму, проте для зручності аналізу в налаштуваннях з виходу осцилографа отримуємо нормоване значення.

Графік перехідного процесу за перевантаженням має вигляд, представлений на рисунку 6.

Із рисунка 6 можна визначити, що при наявності великого моменту інерції механізму кратність пускового моменту теж перевищує значення 4.5, що може призводити до перевантаження електричної мережі.

Висновки.

1. При використанні пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами при малих пускових моментах і суттєвому моменту інерції механізму кратність пускових струмів перевищує значення 4.5.

2. У випадку застосування систем резервного живлення обмеженої потужності, таких як джерела безперебійного живлення та дизельні або бензинові генератори, останні повинні вибиратися із подвійним запасом по вихідному струму з метою уникнення перевантаження.

3. Подальше зниження пускових струмів і, відповідно, потужності пристроїв резервного живлення можливе лише при використанні напівпровідникових перетворювачів частоти.

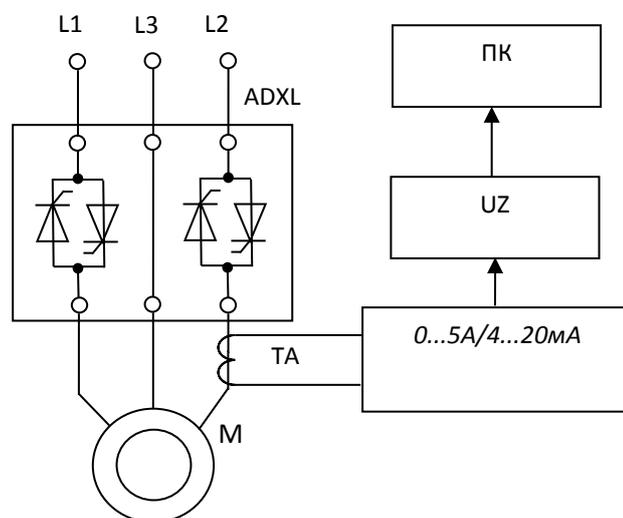


Рисунок 5. Спрощена схема дослідного стенду для отримання перехідних процесів за струмом при пуску двигуна на холостому ході

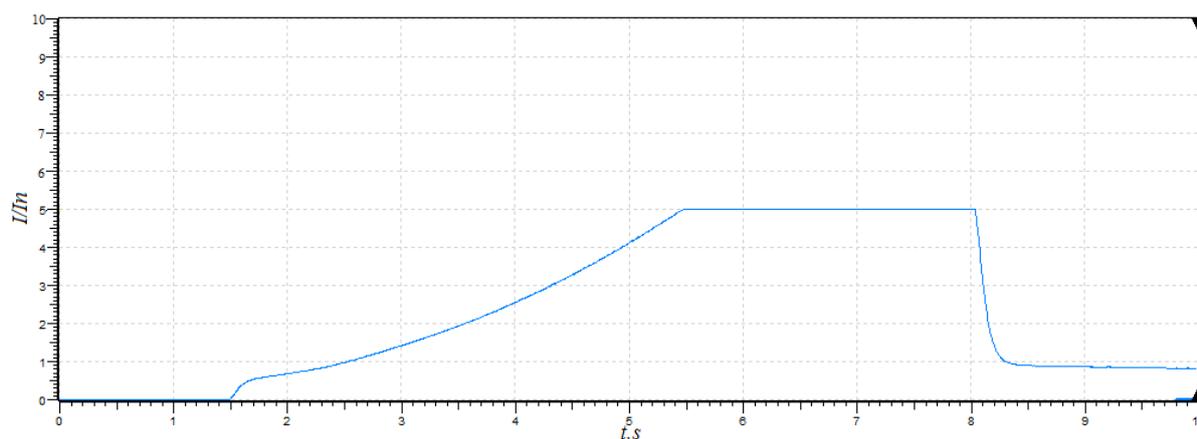


Рисунок 6. Графік перехідного процесу за перевантаженням

Список використаної літератури

1. Регульований електропривод: підручник / І.М. Голодний та ін. Київ: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. 509 с.
2. Abhay M Halmare, Ashish Karnase and Swapnil Kourati. Comparative study of induction motor starters using Matlab Simulink/ International Journal of Advance Research , Ideas and Innovations in Technology. Volume2, Issue2 ISSN: 2454-132X [Online] Available: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v2i2/V2I2-1143.pdf> Accessed on: June 27, 2023
3. Голодний І.М., Лаврінченко Ю.М. Моделювання в MatLab процесу динамічного гальмування асинхронного електропривода. *Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*, 2011. Вип.116, С.73–75.
4. Majid Ghadimi, Amin Ramezani and Mohsen Mohammadimehro. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant// Conference: Proceedings of the UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, EMS 2011, Madrid, Spain, November 16-18, 2011 DOI:10.1109/EMS.2011.57
5. U.Sri Anjaneyulu, T.Satish Babu, Y. Sumith and Y.Narendra Kumar (2019) The Impact of Three Phase Soft Starter Controller on Asynchronous Machine Response to Transients using MATLAB/ International Journal of Scientific Research and Reviews Simulink Volume 8(2), 1320-1334 https://www.ijssr.org/down_82426.php
6. Magnus Kjellberg, Sören Kling. Softstarter handbook. 2004. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/2985284834bcff7fc1256f3a00274038/1SFC132002M0201.pdf> Accessed on: June 22, 2023
7. Калінов А.П., Мельников В.О. Елементи автоматизованого електропривода: навч. посіб. Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В, 2014. 276 с. ISBN 978-617-639-054-1.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М. Г. Попович та ін. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

9.Торопов А.В., Торопова Л.В. Дослідження пуску компресора шарошкового бурового верстату з функцією обмеження струму. *Геоінженерія*. 2021. №5. С. 24-29. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676> (дата звернення: 02.07.2023).

A. Toropov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8505-0266

L. Listovshchuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3413-1802

L. Toropova¹, asst., ORCID 0000-0001-6882-2295

O.Terentiev¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2523-2804

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VIRTUAL MODEL OF THE SYSTEM "INDUCTION MOTOR - SOFTSTARTER WITH TWO CONTROLLED PHASES"

One of the most commonly used start methods of induction motors is starting by gradually increasing the supply voltage. At the same time, softstarters based on thyristors or triacs are used, which are cheaper in comparison with frequency inverters based on IGBT - transistors. In turn, the disadvantage of this method of starting with significant reduction of the starting torque, so the possibility of using such starters for various executive mechanisms requires careful research. In the presence of a limitation of power source power, especially in wartime conditions, the problem of limitation of starting currents, especially in the case of using starters with two adjustable phases, is actual. To take into account the multiplicity of starting currents for different types of mechanisms, a mathematical model of the system "induction motor - softstarter with two controlled phases" was created. The model differs from the known ones by the possibility of limiting the power of the power supply network, the appearance of the mechanical characteristics of the executive mechanism and the starting moment at voltage ramp start mode. Transient processes in relative units for the possibility of estimating the multiplicity of starting currents to determine the required power of the autonomous power source are presented. To assess the adequacy of the mathematical model, a research stand with measuring of motor winding currents using a current transformer and a microprocessor device with an oscillography function was created. In the work, a comparative analysis of the results of modeling and experimental studies on a physical model is carried out, herewith the discrepancy of the results did not exceed 10%. It was determined that when using a soft-start device with two adjustable phases, even with small voltages, the current multiplicity is quite high and requires the use of a power source of greater power, but less than in the case of direct start. Formulated conclusions based on research results and recommendations for further reduction of starting currents.

Keywords: softstarter, voltage ramp, mathematical model, power limitation, thyristor control

References

1. Adjustable electric drive/ Edited by Ivan Golodnyi. - K. Ukraine: LLC "CP" Comprint ", 2015. - 509p
2. Abhay M Halmare, Ashish Karnase and Swapnil Kourati. Comparative study of induction motor starters using Matlab Simulink/ International Journal of Advance Research , Ideas and Innovations in Technology. Volume2, Issue2 ISSN: 2454-132X [Online] Available: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v2i2/V2I2-1143.pdf> Accessed on: June 27, 2023
3. Ivan Golodnyi, and Yury Lavrinenko, "MatLab simulation of the process of dynamic braking of an asynchronous electric drive", Bulletin of KhNTUSG. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine", 2011, Issue 116, pp. 73–75.
4. Majid Ghadimi, Amin Ramezani and Mohsen Mohammadimehro. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant// Conference: Proceedings of the UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, EMS 2011, Madrid, Spain, November 16-18, 2011 DOI:10.1109/EMS.2011.57
5. U.Sri Anjaneyulu, T.Satish Babu, Y. Sumith and Y.Narendra Kumar (2019) The Impact of Three Phase Soft Starter Controller on Asynchronous Machine Response to Transients using MATLAB/ International Journal of Scientific Research and Reviews Simulink Volume 8(2), 1320-1334 https://www.ijssr.org/down_82426.php
6. Magnus Kjellberg, Sören Kling. Softstarter handbook. (2004). [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/2985284834bcff7fc1256f3a00274038/1SFC132002M0201.pdf> Accessed on: June 22, 2023
7. Kalinov A., and Melnikov V. (2014) Elements of an automated electric drive: study guide/– Kremenchuk: Shcherbatykh O.V., -276p. ISBN 978-617-639-054-1
8. Electromechanical automatic control systems and electric drives/Edited by Myhailo Popovych and Orest Lozynskiy. — K.: Lybid, 2005. — 680 p.
9. Toropov, A., and Toropova, L. (2021). Investigation of compressor start-up of cone drilling rig with current limiting function. *Geoengineering*, (5), 24–29. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>

Надійшла: 29.06.2023

Received: 29.06.2023

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ECOLOGICAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 537.84

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289724

О.М. Терентьєв¹, д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-2523-2804

М.В. Кудільчак¹, студент, ORCID 0000-0003-1009-7304

Н.І. Жукова¹, канд. техн. наук ORCID 0000-0002-4215-6981

С.В. Кудільчак¹, студент, ORCID 0000-0002-9978-5121

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЧИЩЕННЯ РІДИНИ ВІД ДОМІШОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ

Важливість очищення рідин полягає в зниженні концентрації забруднюючих речовин в основному потоці під час її використання. У цій роботі проаналізовано актуальність досліджень очищення рідини згідно наявних законодавчих актів. Проведено аналіз актуальних фізичних та хімічних способів очищення рідини. Описано створення робочої камери групування (РКГ) домішок для очищення рідини. Результатом досягнуто електромагнітним впливом на заряджені домішки. Сформовано наукову новизну дослідження створенням параболоїду обертання домішок. Принцип дії системи очищення продемонстровано на прикладі групування домішок масла та води. Результати досліджень показують можливість очищення рідини за допомогою керування траєкторії руху домішок. В роботі використані рівняння Діні (італ. Ulisse Dini) для опису математичної моделі групування домішок. Створено модель траєкторії руху домішок в оболонці LabVIEW. Перевірено можливість доочищення рідини методом електромагнітного групування та подальшого виведення домішок з потоку. Дослідження полягає у встановленні котушок індуктивності на зовнішній поверхні камери групування домішок. Визначено траєкторію руху домішок в магнітному полі. Електромагнітний вплив на заряджені домішки змінює їх траєкторію руху та змушує домішки рухатись за радіусом Лармора. При зростанні величини електромагнітного поля швидкість руху домішок збільшується, а радіус руху домішок зменшується. Доведено, що домішки з меншою густиною краще концентруються в центрі РКГ. Обрано параметри котушок для створення електромагнітного поля. На макеті відтворено модель обертання домішок масла у воді. Перевірено зміну питомої провідності водного середовища при зростанні індукції магнітного поля. На першому етапі запропоновано конструкцію стенду доочищення рідини методом електромагнітного групування домішок. Надано практичні рекомендації для досягнення ефективності електромагнітного способу очищення рідини та її повторного використання.

Ключові слова: доочищення рідини, домішки, магнітне поле, сила Лоренца, параболоїд обертання, видалення домішок.

Вступ. Завдання раціонального використання водних ресурсів та зменшення їх втрат є актуальним [1]. Раціональне використання водних ресурсів та ефективне очищення забруднених стічних вод має важливе народногосподарське значення. Водним кодексом України [2] визначено поняття "зворотна вода" — це вода, що повертається за допомогою технічних споруд і засобів з господарської ланки кругообігу води в його природні ланки у вигляді стічної, шахтної, кар'єрної чи дренажної води. Згідно п. 18 Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами, встановлені нормативи гранично допустимих скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти [3]. Відповідно до цих документів, тема очищення води є актуальною.

Корпорація Exxon-Mobil, встановила, що один літр відпрацьованої рідини може зіпсувати мільйон літрів питної води [4]. Це аналогічно забрудненню океанів нафтопродуктами, спричиненими техногенними катастрофами та викидами, що є глобальною проблемою [5]. Нафта та нафтопродукти негативно впливають на морські біоценози – сукупність живих істот у межах однієї екосистеми. Склад нафти токсичний [6]. Відомі методи очищення води від нафтових плівок не можуть повністю усунути дане завдання.

Відомі фізичні та хімічні способи доочищення рідини. Фізичні способи очищення і доочищення рідини здійснюються за допомогою зовнішніх силових полів, без додавання хімічних речовин. Хімічні способи очищення полягають у використанні реагентів та складних технічних установок [7]. В Україні прийнятий закон «Питна вода України на 2022-2026 роки», яка визначає необхідність очищення як

пріоритетний напрямок наукової діяльності [8]. У передових країн це питання є важливим для побутових цілей та промисловості [9]. Кількість домішок у рідині може бути різною за типом та структурою. Для розробки способів очищення домішки об'єднують в групи за певними ознаками. За допомогою механічних способів очищення з рідини виводять нерозчинені грубо дисперсні домішки, мінерального та органічного походження. Актуальними способами очищення є: проціджування, відстоювання, фільтрування, дистиляція, мікрофільтрація. Недоліками вищевказаних методів є енергоємність, час здійснення процесу та складність видалення речовин. Після аналізу відомих вітчизняних та закордонних систем очищення рідини сформульована мета дійсного дослідження.

Метою роботи є доочищення рідини управлінням траєкторією руху домішок для їх подальшого виведення із потоку і повторного використання рідини у технологічному процесі. До **завдань** віднесені:

1. Аналіз та створення моделі групування домішок з подальшим їх виведенням з потоку.
2. Вибір базової математичної моделі групування та видалення домішок.
3. Створення макету доочищення рідини та видалення домішок з основного потоку.
4. Підготувати висновки і практичні рекомендації з видалення домішок з основного потоку.

Наукова новизна полягає у тому, що:

– підтверджено зростання індукції електромагнітного поля має експоненціальний характер при іонізації забруднюючих домішок викликаючи зміну питомої електропровідності водного середовища;

– встановлено, що закономірності взаємодії домішок забруднюючих водне середовище електромагнітним полем визначаються лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами і спеціальною правою частиною у вигляді багаточлена;

– доведено, що залежність амплітуди коливаний домішок забруднюючих водне середовище від індукції електромагнітного поля апроксимується за гіперболічним законом, а від витрати рідини в гідросистемі лінійна.

Для дослідження розроблено робочу камеру групування домішок (РКГ). За допомогою РКГ домішки мають можливість окремого введення з основного потоку рідини. На рисунку 1 показано камеру групування домішок

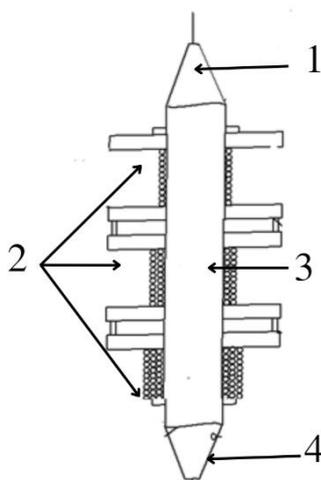


Рисунок 1. Робоча камера групування домішок: 1 – вузол вводу рідини; 2 – соленоїди, 3 – камера з котушками для групування домішок; 4 – днище РКГ з центральним отвором видалення домішок з рідини.

При створенні РКГ на її зовнішній поверхні встановлено певну кількість котушок індуктивності. Перша верхня котушка намотана дротом більшого перерізу з найменшою кількістю витків. Індуктивність наступних котушок збільшується за рахунок збільшення кількості витків та зменшення діаметру дроту, яким їх намотували. Таке розміщення котушок на зовнішній поверхні РКГ створює вплив сили Лоренца на заряджені частинки і змушує їх рухатись по радіусу Лармора [10] Радіус орбітального руху домішок зменшується. Поступове зростання індуктивності котушок і розміщення їх зовні робочої камери забезпечує фокусування домішок у параболоїд обертання, їх траєкторія наближається до вигляду конічної спіралі. Крім того, на вході у РКГ формується більший діаметр параболоїда обертання 100 мм. У нижній частині РКГ на виході системи утворено менший діаметр параболоїда (15-20) мм. Перша, верхня котушка з внутрішнім діаметром 100 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом $1,5 \text{ мм}^2$ з кількістю витків – 150. Друга котушка внутрішнім діаметром 95 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом 1 мм^2 з кількістю витків – 300. Третя котушка внутрішнім діаметром 90 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом $0,35 \text{ мм}^2$ з кількістю витків – 600. Висота робочої частини РКГ – 305 мм. Об'єм забрудненої рідини в РКГ дорівнює $2,39 \text{ дм}^3$. Радіус

орбітального руху домішок зменшується при зростанні індуктивності котушок і є мінімальним біля отвору у днищі для видалення домішок.

Вибір математичної моделі групування домішок рідини

У роботі розглянуто теоретичні підходи з використанням рівнянь Діні, для створення моделі групування домішок. Подібність між вирами та чорними дірками виявляється в тому, що щось, що опинилося поблизу цих об'єктів, залучається до них і ніколи не повертається і деякий час утримується в середині воронки [11].

Матеріали та методи досліджень макету групування домішок. Вибір засобів вимірювань.

Оцінювання очищення рідини від домішок проводилось вимірюванням концентрації заряджених часточок у рідинному середовищі на вході і виході пристрою електромагнітного очищення. Для досліджень обрано кондуктометр ИПП-М-30 науково-виробничого підприємства «Зонд» (м. Харків). Кондуктометр ИПП-М-30 зареєстрований у Державному реєстрі засобів вимірів за номером № У1443-01. Сертифікат про затвердження типу засобів вимірювання UA-MI/p-991-2001.

Методика та програма дослідження макету групування домішок.

Англійський фізик О. Рейнольдс при вивченні руху рідини по прямій трубці, помітив, що при малих швидкостях кожна частинка рухається прямолінійно (ламінальний рух). Якщо збільшити швидкість частинок, в потоці утворюються завихрення [12]. Швидкість руху течії максимальна в центрі трубки і зменшується біля стінки (турбулентний рух). Перехід течії ламінарного руху в течію турбулентного залежить від діаметру труби, швидкості руху, в'язкості та густини рідини. Під час дослідів здійснювалось регулювання швидкості руху рідини для вибору оптимального режиму роботи макету групування.

За рівняннями Улісса Діні [13] створено модель траєкторії зарядженої частинки, яка навівається на лінії магнітної індукції. Моделювання проведено в оболонці LabVIEW.

$$\begin{aligned} x &= ae^{k\varphi} \cos\varphi, \\ y &= ae^{k\varphi} \sin\varphi, \\ z &= be^{-k\varphi}, \\ x &= at \cos(t), \\ y &= at \sin(t), \\ z &= bt. \end{aligned} \tag{1}$$

На рисунку 2 зображено математичну модель виру обертання молекул рідини з домішками у вигляді віртуального дослідницького приладу.

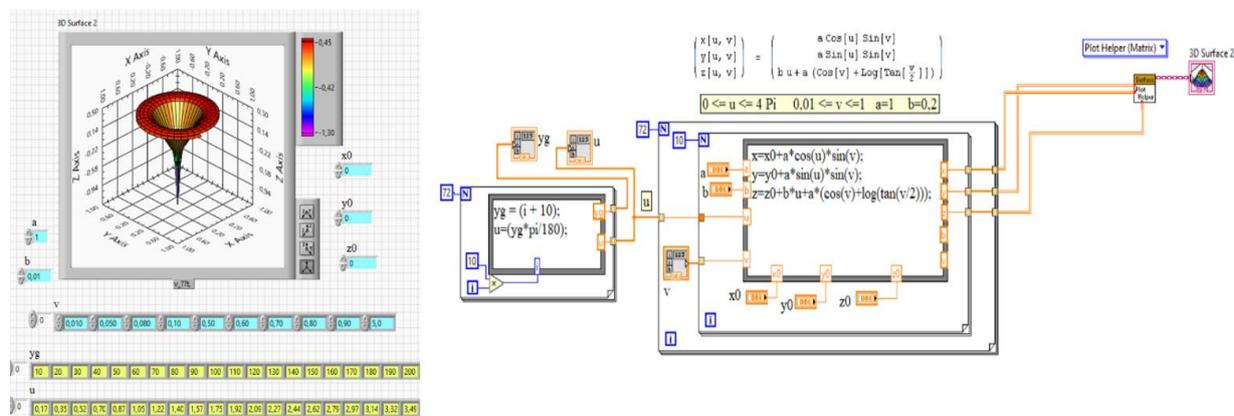


Рисунок 2. - Рівняння Діні підготовлене для реалізації макету параболоїду обертання в оболонці LabVIEW.

Робота фізичної моделі доочищення рідини від домішок групуванням, показана на рисунку 3а) та 3б). Принцип роботи показано на рисунку 3. Він полягає в концентруванні домішок в центрі фізичної моделі під дією гравітаційного поля Землі. Групування домішок вздовж осі створеної фізичної моделі відбулось через різницю між значеннями густини молекул протестованих речовин, а саме 861 кг/м³ для масла типу API TC [14] і води 1000 кг/м³ [15].

Доочищення рідини від домішок пропонується досягти їх групуванням (скупченням) вздовж осі робочої камери групування. Мінімальний діаметр обертання домішок визначений діаметром отворів видалення домішок з потоку рідини у бак забрудненої рідини. Взаємодію між масами домішок та води можна описати гравітаційно-магнітними силами Лоренца, які діють так само як рухомі електричні заряди в електродинаміці. При русі зарядженої частки у магнітному полі сила Лоренца роботи не здійснює. Тому модуль вектору швидкості під час руху частки не змінюється. Якщо заряджена частка рухається в однорідному магнітному полі під дією сили Лоренца а її швидкість лежить у площині, перпендикулярній

вектору магнітної індукції, то частка рухатиметься по колу радіусу Лармора [16]. Це зображено на рисунку 4. Тому, для зниження концентрації домішок у рідині, використано силу Лоренца.

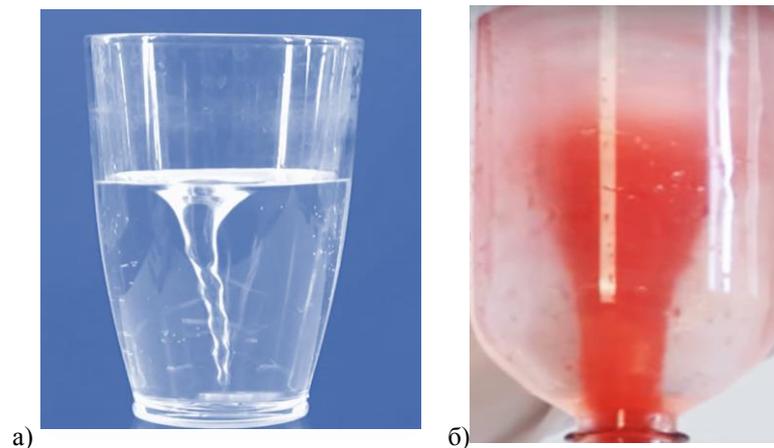


Рисунок 3. а) фізична модель обертання води. б) фізична модель обертання води з домішками масла двох тактового двигуна API TA забарвленого в червоний колір.

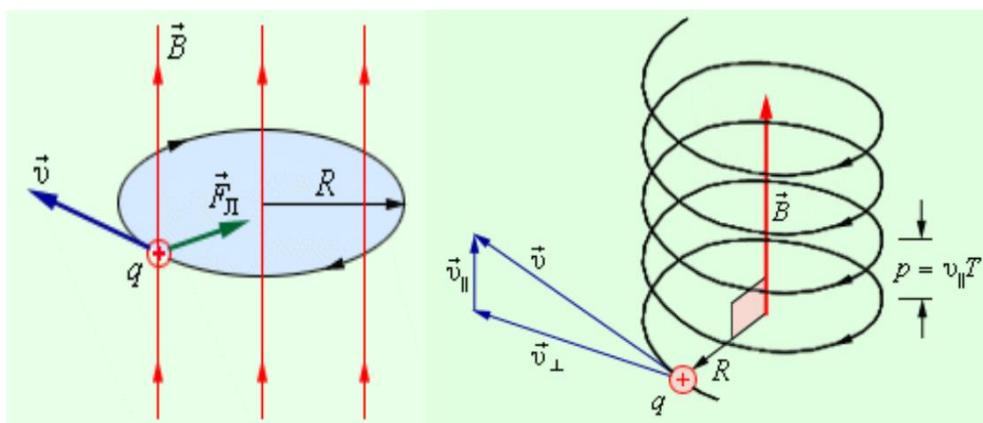


Рисунок 4. – Коловий рух частинки в магнітному полі [17].

Висновки. 1. Проведено аналіз відомих систем очищення рідинних середовищ, доведена можливість створення виру домішок густиною 861 кг/м^3 в рідині густиною 1000 кг/м^3 їх скупченням коло осі меншого радіусу біля отвору видалення домішок.

2. Обрано, за базову математичну модель на основі рівнянь Діні для процесу групування домішок за допомогою магнітного поля.

3. Створено макет очищення і видалення домішок з потоку висотою 305 мм та діаметром 100 мм, що дозволило в три рази скоротити матеріальні і часові витрати та обрати раціональні параметри системи очищення рідинних середовищ.

4. Для кращого моделювання системи видалення домішок з основного потоку доцільно створити дослідницький стенд, на якому провести повні дослідження при швидкості руху рідини 1 м/с, що на порядок скоротить матеріальні і часові витрати при визначених параметрах для різних рідинних середовищ, що забруднюють робочі рідини.

Практичні рекомендації. 1. Робота робочої камери групування полягає в управлінні траєкторією руху заряджених домішок.

2. Необхідно забезпечити концентрацію домішок уздовж осі робочої камери для подальшого їх видалення.

3. За рахунок розміщення котушок різної індуктивності на зовнішній поверхні РКГ забезпечується рух домішок всередині РКГ за радіусом Лармора.

4. Для регулювання концентрації магнітного поля всередині РКГ необхідно обирати параметри системи, які забезпечують утворення параболоїда обертання домішок вздовж осі камери.

Список використаної літератури

1. *Стан водних ресурсів і методи очищення води: Журнал ECOBUSINESS* (2016) Головна. Available at: <https://ecolog-ua.com/articles/stan-vodnih-resursiv-i-metodi-ochishchennya-vodi> (Accessed: March 15, 2023).
2. *Водний Кодекс України* Вводиться в дію Постановою ВР № 214/95-ВР від 06.06.95, ВВР, 1995, № 24, ст. 190. вводится в дію № 2468-ІХ від 28.07.2022.
3. *Постанова КМУ*. Про затвердження п. 18, Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами від 25 березня 1999 р. № 465. Из змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 748 (748-2013-п) від 07.08.2013 р.
4. *Харківський національний автомобільно-дорожній університет* (2019) *ХНАДУ*. Available at: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%91%D0%9A_%D0%90%D0%9D%D0%A1/VIDPRATSO VANI_MASTYLA.pdf (Accessed: March 15, 2023).
5. Б. І. Дембович and С. В. Яворська (2013) *Забруднення океанів нафтою та нафтопродуктами, Забруднення океанів нафтою та нафтопродуктами | Кафедра зоології та екології ДНУ*. Available at: https://www.zoology.dp.ua/z13_023.html (Accessed: March 15, 2023).
6. Голик, О.П. et al. (2019) *СУЧАСНІ МЕТОДИ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВІВ НАФТИ НА ВОДНИХ ОБ'ЄКТАХ СУХОДОЛЛЮ*. Available at: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12>.
7. Литвиненко, В. А. (2018). *«Модернізація установки мікробіологічного очищення стічних вод хімічних підприємств»* (dissertation). Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Київ, Україна.
8. *ЗАКОН УКРАЇНИ Про Загальнодержавну цільову соціальну програму "Питна вода України" на 2022 - 2026 роки*. LIGA360. (n.d.). Retrieved February 28, 2023, from <https://ips.ligazakon.net/document/LI05633A?an=3>.
9. Кожевніков, В.А. (no date) "Огляд доповідей, з коментарями III Міжнародної конференції «Альтернативні джерела енергії для великих міст» Секція: Енергетика великих міст: нові технології та використання."
10. Garry McCracken and Peter Stott (2012) *Magnetic confinement, Fusion (Second Edition)*. Academic Press. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123846563000052>.
11. Francisco J. Bernn-Vera, Yan Wang, Maria J. Olascoaga, Gustavo J. Goni, George Haller, Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage. *J. Phys. Oceanogr.*, 43, 1426-1438, 2013. Francisco J. et al. (2013) *Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage*. *J. Phys. Oceanogr.*
12. Халатов, А. А., Мочалін, Є. В., & Димитрієва, Н. Ф. (2019). *Основи Теорії Примежового Шару*. (Т. В. Литвинова, Ed.). КПП ім. Ігоря Сікорського. Retrieved February 28, 2023, from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_NavchPosib_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva_2019.pdf.
13. Gray, A. (1997) *Dini's Surface, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 493-495, 1997.
14. *Масло моторне Pennasol two stroke speed. API TC* (no date) *ТЕХНО_СИНТЕЗ ОЙЛ*. Available at: <https://sintez-oil.com.ua/ua/p493889914-maslo-motornoe-pennasol.html> (Accessed: March 17, 2023).
15. О.Ф. Шульженко (2017) *Фізичні властивості води, Фізичні та хімічні властивості води - КІП*. Available at https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjE4_P_5OP9AhWLg_0NHZnUDT0QFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fela.kpi.ua%2Fbitstream%2F123456789%2F20784%2F1%2FEkologich_monitoring.docx&usg=AOvVaw3YBjVIZbXOpekBeJNwqZA5.
16. Bellan P. M. *Fundamentals of Plasma Physics*. Cambridge University Press, 2012.
17. § 52. *Сила Лоренца* (no date) *StudFiles*. Available at: <https://studfile.net/preview/5226287/page:61/> (Accessed: March 15, 2023).

O. Terentiev¹ Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2523-2804

M. Kudilchak¹, student, ORCID 0000-0003-1009-7304

N. Zhukova¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-4215-6981

S. Kudilchak¹, student, ORCID 0000-0002-9978-5121

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

PURIFICATION OF LIQUIDS IMPURITIES BY ELECTROMAGNETIC INFLUENCE

The importance of liquid purification leads to a decrease in the concentration of pollutants mainly in the stream during its use. This paper analyzes the relevance of document verification in accordance with existing legislation. An analysis of actual physical and chemical methods of liquid purification was carried out. The creation of a working chamber for the grouping of impurities for liquid purification is described. The result was achieved by electromagnetic influence on charged impurities. The scientific news of the study of the creation of a paraboloid of rotation of impurities has been created. The principle of operation of the cleaning system is shown on the example of the grouping of oil and water impurities. Research results show the possibility of liquid purification by controlling the trajectory of impurities. The work uses the Dini equation (Italian: Ulisse Dini) to describe the mathematical model of the grouping of impurities. A model of the trajectory of impurities in the LabVIEW shell was created. The possibility of further purification of the liquid by the method of electromagnetic grouping and

subsequent removal of impurities from the flow was verified. The study takes place in the installation of inductance coils on the outer surface of the impurity grouping chamber. The trajectory of the movement of impurities in the magnetic field is determined. The electromagnetic influence on the charged impurities changes their trajectory and causes the impurities to move along the Larmor radius. When the magnitude of the electromagnetic field increases, the speed of movement of the impurity increases, and the radius of motion of the impurity decreases. It has been proven that impurities with a lower density are better concentrated in the center of the RKG. The parameters of the coils for creating an electromagnetic field are selected. The model of the rotation of oil impurities in the driver is reproduced on the model. The change in the specific conductivity of the water medium with increasing magnetic field induction was verified. At the first stage, we offer the construction of a stand for further purification of liquid by the method of electromagnetic grouping of impurities. Practical recommendations are given for achieving the efficiency of the electromagnetic method of liquid purification and its reuse.

Keywords: *liquid purification, impurities, magnetic field, Lorenz force, paraboloid of rotation, focusing of impurities.*

References

- 1.State of water resources and methods of water purification: ECOBUSINESS Magazine (2016) Main. Available at: <https://ecolog-ua.com/articles/stan-vodni-resursiv-i-metodi-ochishchennya-vodi> (Accessed: March 15, 2023).
- 2.The Water Code of Ukraine was put into effect by the decision of the Supreme Court dated 06.06.1995 N 214/95-VR, Supreme Court, 1995 N 24, Article 190. N 2468-IX dated 07.07. 28/2022 entered into force.
- 3.Resolution of the CMU. On the approval of clause 18 of the Rules for the protection of surface waters from pollution by return waters dated 03.25.1999 No. 465. With changes introduced in accordance with the resolution of the CMU dated 07.08.2013 No. 748 (748-2013).
- 4.Kharkiv National Automobile and Road University (2019) Khnadu. Access mode: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%91%D0%9A_%D0%90%D0%9D%D0%A1/VIDPRATSO VANI_MASTYLA.pdf (View date: March 15, 2023 .)
- 5.Dembovych B. I., Yavorska S. V. (2013) Pollution of oceans with oil and petroleum products, Pollution of oceans with oil and petroleum products | Department of Zoology and Ecology of DNU named after Access mode: https://www.zoology.dp.ua/z13_023.html (View date: 03/15/2023).
- 6.Golyk O.P. and others. (2019) MODERN METHODS OF ELIMINATION OF EMERGENCY OIL SPILLS ON LAND WATER BODIES. Available at: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12>.
- 7.Lytvynenko, V. A. (2018). "Modernization of the installation of microbiological wastewater treatment of chemical enterprises" (dissertation). Institute of Energy Saving and Energy Management, Kyiv, Ukraine.
- 8.THE LAW OF UKRAINE On the Nationwide Targeted Social Program "Drinking Water of Ukraine" for 2022-2026. LIGA360. (n.d.). Retrieved February 28, 2023, from <https://ips.ligazakon.net/document/JI05633A?an=3>.
- 9.Kozhevnikov, V.A. (no date) "Review of reports, with comments of the 3rd International Conference "Alternative energy sources for large cities" Section: Energy of large cities: new technologies and use."
- 10.Garry McCracken and Peter Stott (2012) *Magnetic confinement, Fusion (Second Edition)*. Academic Press. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123846563000052>.
- 11.Francisco J. Bernn-Vera, Yan Wang, Maria J. Olascoaga, Gustavo J. Goni, George Haller, Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage. J. Phys. Oceanogr., 43, 1426-1438, 2013. Francisco J. *et al.* (2013) *Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage*. J. Phys. Oceanogr
- 12.12. Khalatov, A. A., Mochalin, E. V., & Dimitrieva, N. F. (2019). Basics of Boundary Layer Theory. (T.V. Litvynova, Ed.). KPI named after Igor Sikorsky. Retrieved February 28, 2023, from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_NavchPosib_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva_2019.pdf.
- 13.Gray, A. (1997) *Dini's Surface, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 493-495, 1997.
- 14.Motor oil Pennasol two stroke speed. API TC (no date) TECHNO_SYNTHESIS OIL. Access mode: <https://sintez-oil.com.ua/ua/p493889914-maslo-motornoe-pennasol.html> (Access date: 03/17/2023).
- 15.O.F. Shulzhenko (2017) Physical properties of water, Physical and chemical properties of water - KPI. Available at https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjE4_P_5OP9AhWLg_0HHZnUDT0QFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fela.kpi.ua%2Fbitstream%2F789%2F20784%2F1%2FEkologich_monitoring.docx&usq=A0vVaw3YBjVIZbXOpekBeJNwqZA5.
16. Bellan P. M. Fundamentals of Plasma Physics. Cambridge University Press, 2012.
- 17.§ 52. Lorentz force (no date) StudFiles. Available at: <https://studfile.net/preview/5226287/page:61/> (Accessed: March 15, 2023).

Надійшла: 12.04.2023

Received: 12.04.2023

В.В. Серета¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4645-3123Лю Ян¹, аспірант, ORCID 0000-0001-9535-4984Т.Л. Подстєвая¹, аспірант, ORCID 0009-0000-5919-3650¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ КОНТАКТНИЙ ЗВОЛОЖУВАЧ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОПРІСНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Метою роботи є підвищення ефективності термічних опріснювальних установок з циклом зволоження – осушення повітря за рахунок зменшення споживання електричної енергії. Найпоширеніші конструкції теплообмінників для зволоження повітря мають значні аеродинамічні і гідравлічні опори. Для усунення цього недоліку запропоновано використати внутрішній об'єм вертикальної трубки як активну зону тепломасообміну під час випаровування вологи з солоної води до повітря. Проведено математичне моделювання роботи такої установки та визначені її енергетичні характеристики. Особливістю математичної моделі є врахування рівнянь тепло і масопередачі в зволожувачі та осушувачі. Підбрано оптимальну швидкість руху повітря в трубці (3 м/с). Встановлено, що для ефективної роботи установки із плівковим зволожувачем витрата повітря має дорівнювати витраті солоної води, а геометричні розміри трубки повинні бути в межах: діаметр 20...30 мм, висота 2...2,5 м. Проведене математичне моделювання і отримані результати дають підстави стверджувати, що за однакової швидкості випаровування, аеродинамічний і гідравлічний опори плівкового теплообмінника будуть мінімальними порівняно з іншими типами зволожувачів. Застосування такого контактного апарату призведе до зменшення споживання електричної енергії, необхідної для циркуляції води і повітря в установці.

Ключові слова: енергетичні характеристики, зволоження-осушення повітря, контактний теплообмінник, математичне моделювання, термічне опріснення.

Вступ. У найближчому майбутньому різке перенаселення, а також забруднення прісних вод промисловими відходами, які скидаються в річки та підземні водні джерела призведуть до глобального дефіциту прісної води. Пошук нових джерел прісної води є важливим для вирішення цієї загрози. Враховуючи те, що морська вода займає 97% водних ресурсів світу, технології опріснення морської води є одним із найкращих рішень для боротьби з дефіцитом прісної води [1].

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВОЗ) стверджує, що допустимі рівні солоності питної води становлять від 500 до 1000 частинок на мільйон (part per million, ppm). На Землі більшість наявних запасів питної води має солоність до 10^4 ppm, тоді як солоність морської води становить $3,5 \dots 4,5 \cdot 10^4$ ppm [2]. Основне завдання опріснювальних систем полягає в очищенні морської або солонуватої води та зменшення їх солоності до допустимого рівня [3]. Опріснення здійснюється або термічно (шляхом випаровування морської води), або механічно (з використанням мембран). Обидві технології дозволяють отримати прісну воду високої чистоти. Однак термічне опріснення надійне та ефективне лише для великих (понад 100 тон на день) потужностей виробництва питної води. Цей метод надто дорогий для отримання невеликої кількості прісної води і не може використовуватися в таких місцях, як острови або віддалені райони з обмеженим енергопостачанням [4]. Те саме стосується і мембран. Їх використання обмежене за відсутності електрики [4].

Актуальним на сьогодні є пошук рішень саме для децентралізованого і маломасштабного виробництва прісної води, які можна застосовувати у віддалених громадах, які не підключені до електричної або водорозподільної мережі. Однією з таких технологій є опріснення морської води за допомогою зволоження-осушення повітря (humidification-dehumidification, HDH). Ця технологія аналогічна природному гідрологічному циклу води, коли сонячне світло нагріває морську воду і випаровує краплі чистої води з верхньої поверхні океану, утворюючи хмари. Далі хмари поступово конденсуються і у вигляді опадів випадає чиста вода [5]. Метод HDH має ряд переваг, зокрема помірну робочу температуру, атмосферний робочий тиск, просту конструкцію, низькі початкові та експлуатаційні витрати [6]. Однак, HDH система потребує значної кількості теплової енергії для видалення небажаних солей із морської води. Тому застосування поновлюваної енергії (зокрема сонячної) як альтернативи традиційним енергетичним ресурсам, має зростаючу тенденцію в розвитку технологій опріснення HDH. Поєднання відновних або вторинних джерел енергії з технологією HDH забезпечує значні переваги порівняно з традиційними способами опріснення [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні десятиліття технологія HDH широко досліджувалась у різних наукових працях. Основна увага приділяється як термодинамічному і

експертному аналізу різних схем опріснювальних установок HDH, так і підвищенню ефективності теплообмінників HDH систем [6,7,8]. В складі установки є два теплообмінника – зволожувач і осушувач повітря (рис. 1). У зволожувачі відбувається випаровування вологи з солоної води до повітря. В осушувачі або конденсаторі волога з повітря конденсується для отримання необхідної кількості свіжої (прісної) води. Найбільшу зацікавленість у науковців викликає вдосконалення конструкції саме зволожувача з метою підвищення кількості випаровуваної вологи до повітря за мінімальних затрат теплової та механічної енергії [9-14]. Багато різних конструкцій зволожувачів повітря пропонується до використання в системах опріснення HDH. Найпоширенішими є барботажні колони, розпилювальні апарати і теплообмінники з пакувальним матеріалом [9-14].

У барботажному зволожувачі [9,10] повітря барботує через шар солоної води з використанням труб з дрібними отворами (3-6 мм). При цьому створюється велика міжфазна поверхня між водою та газом, що сприяє інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів. Однак дані апарати мають значний аеродинамічний опір у порівнянні з іншими типами зволожувачів за однакової продуктивності.

У зволожувачах розпилювального типу [11,12] повітря рухається вгору і контактує з солоною водою, яка розпилюється з форсунок, і стікає вниз. Такі теплообмінники мають незначну продуктивність (порівняно з іншими типами) та потребують значного напору для прокачування води через форсунки.

Для покращення тепло і масообміну внутрішній простір розпилювальних зволожувачів заповнюють пакувальним матеріалом різного типу [13,14]. Таке рішення забезпечує велику площу поверхні як для тепло, так і для масообміну між краплями води і повітрям, що дозволяє досягти великої (до 4 тон на годину) продуктивності. Але разом з тим суттєво збільшується аеродинамічний опір через необхідність продування повітря крізь шар пакувального матеріалу.

Оглядаючи наявні дослідження, можна зробити висновок, що технологія HDH є багатообіцяючою саме для маломасштабного виробництва води та має широкі можливості для застосування поновлювальних енергетичних ресурсів. Поширені конструкції зволожувачів забезпечують ефективний тепло і масообмін між солоною водою і повітрям, однак мають значні втрати тиску як по повітрю, так і по воді. Отже, у подальших дослідженнях необхідно спрямувати зусилля на зменшення споживання механічної енергії, необхідної для циркуляції води/повітря через теплообмінники установки. Мінімальне споживання енергії насосами/вентиляторами дозволить підвищити ефективність HDH систем та повністю перевести їх на роботу від поновлюваної енергії.

Мета та завдання. Провести дослідження роботи установки із зволожувачем плівкового типу за допомогою математичного моделювання. Визначити геометричні розміри апарату та витрати повітря і солоної води для отримання максимальних показників продуктивності і енергетичної ефективності HDH системи. Порівняти ефективність плівкового теплообмінника з іншими поширеними конструкціями зволожувачів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опис роботи установки з плівковим зволожувачем.

Основними елементами опріснювальної установки є два теплообмінника – зволожувач і осушувач, сонячний водонагрівач, водяна помпа і повітродувка (рис. 1). Установка має відкриті повітряний і водяний контури. Детальний опис роботи такої схеми опріснення наведено у [6,7]. Особливістю запропонованої конструкції є використання як зволожувача – контактного теплообмінника плівкового типу. Апарат являє собою вертикальну трубку, по внутрішній поверхні якої стікає плівка рідини, яка взаємодіє із зустрічним потоком повітря.

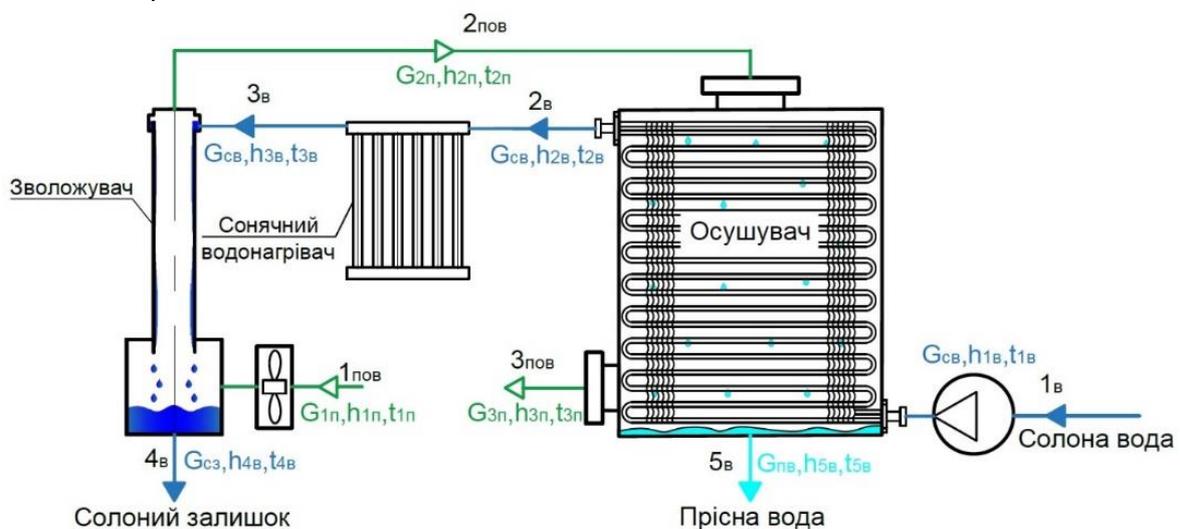


Рисунок 1. Опріснювальна установка із плівковим зволожувачем

Солона вода температурою t_{1e} і витратою G_{ce} помпою подається до осушувача поверхневого типу, де підігрівається до температури t_{2e} . Далі вода надходить до сонячного нагрівача, в якому догрівається до температури t_{3e} . У зволожувачі вода рівномірно розподіляється по внутрішній поверхні труби, стікає плівкою і видаляється із апарату, як солоний залишок. Повітродувка нагнітає у трубку зовнішнє повітря температурою t_{1n} і витратою G_{1n} . У зволожувачі вологовміст повітря підвищується під час контакту з плівкою підігрітої рідини. Одночасно повітря нагрівається до температури t_{2n} . Утворена пароповітряна суміш надходить до конденсатора, де її вологовміст знижується. Далі повітря видаляється з осушувача у навколишнє середовище. Утворений конденсат являє собою кінцевий продукт – чисту прісну воду.

Розроблення математичної моделі. Математична модель роботи установки із зволожувачем нового типу була розроблена за допомогою інженерного забезпечення PTC Mathcad. Властивості вологого повітря та солоної води визначалися за допомогою пакета CoolProp [15]. У модель включені наступні рівняння:

- тепловий баланс зволожувача:

$$Q_6^{3e} = G_{ce} h_{3e} - (G_{ce} - G_{ne}) h_{4e}. \quad (3)$$

$$Q_n^{3e} = G_n (1 + d_{2n}) h_{2n} - G_n (1 + d_{1n}) h_{1n}. \quad (4)$$

- тепловий баланс осушувача:

$$Q_6^{oc} = G_{ce} (h_{2e} - h_{1e}). \quad (5)$$

$$Q_n^{oc} = G_n (1 + d_{2n}) h_{2n} - G_n (1 + d_{3n}) h_{3n} - G_{ne} h_{5e}. \quad (6)$$

- кількість теплоти, яка передається від нагрітої води до повітря у зволожувачі за рахунок тепло- і масовіддачі:

$$Q_m^{3e} = Q_{вин} + Q_{конв} = \Delta G h_{vl} + \alpha_{конв} F_{фаз} \Delta T, \quad (7)$$

де $Q_{вин}$ – теплота, яка передається випаровуванням води в повітря, Вт; $Q_{конв}$ – теплота передана повітрю за рахунок його нагрівання, Вт; ΔG – кількість вологи, яка буде поглинена повітрям, кг/с; h_{vl} – питома теплота пароутворення, Дж/кг; $\alpha_{конв}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, В/(м²·К); $F_{фаз}$ – площа міжфазної поверхні, м²; ΔT – середньологарифмічний температурний напір, °С.

- кількість теплоти, яка передається від повітря до солоної води у осушувачі за рахунок теплопередачі:

$$Q_m^{oc} = k F_m \Delta h. \quad (8)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); F_m – площа поверхні теплообміну, м²; Δh – середньологарифмічна різниця ентальпій на вході і на виході з осушувача.

Покрокові методики розрахунку теплопередачі у плівковому зволожувачі та поверхневому осушувачі наведені у [16] та [17] відповідно. Припущення прийняті під час моделювання і детальний опис балансових рівнянь зволожувача і осушувача наведено у [6,7].

Для моделювання роботи установки було прийняті наступні вихідні дані:

- температура солоної води на вході в установку $t_{1e} = 15$ °С;
- температура солоної води на вході до зволожувача, після сонячного водонагрівача $t_{3e} = 50$ °С;
- швидкість повітря у зволожувачі постійна $w_{1n} = 3$ м/с;
- параметри зовнішнього повітря $t_{1n} = 25$ °С, $\omega_{1n} = 50\%$;
- відносні вологості повітря на виході з зволожувача (на вході до осушувача) і на виході з установки рівні $\omega_{2n} = \omega_{3n} = 95\%$;
- температура конденсату на виході з осушувача визначалася як середнє значення між температурою точки роси повітря на вході до теплообмінника і температурою повітря на виході:

$$t_{5e} = 0,5(t_{2n}^{m,p} + t_{3n}). \quad (9)$$

Результатом моделювання є значення температур повітря і солоної води на виході із теплообмінних апаратів (t_{2n} , t_{3n} , t_{2e} , t_{4e}) за різних G_{ce} , G_n та геометричних розмірів зволожувача (діаметра d і висоти h). Після отримання результатів визначалися наступні енергетичні характеристики:

- продуктивність установки:

$$G_{ne} = G_n (d_{2n} - d_{3n}); \quad (10)$$

- кількість теплоти, яка підводиться до нагрівача:

$$Q_{наг} = G_{ce} (h_{3e} - h_{2e}) = G_{ce} c_p (t_{3e} - t_{2e}), \quad (11)$$

де c_p – теплоємність води, кДж/(кг·К);

- коефіцієнт енергетичної ефективності (gain output ratio, GOR):

$$GOR = G_{ne} r / Q_{наз} , \quad (12)$$

де r – питома теплота пароутворення, кДж/кг;

- відношення G_{cv} до G_a (коефіцієнт масової витрати, mass flow rate ratio, MR):

$$MR = G_{cv} / G_n . \quad (13)$$

- аеродинамічні втрати тиску у зволожувачі з врахуванням входу і виходу повітря з трубки:

$$\Delta P_n = 0,5 \left(\lambda \frac{h}{d} + 1,5 \right) \frac{1}{\rho_{1a}} \left(\frac{4G_a}{\pi d^2} \right)^2 , \quad (14)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя в трубці. Для плівкового стікання води з праці [16]:

$$\lambda = 0.3164 \left(\frac{4G_a}{\mu_{1a} \pi d^2} \right)^{-0.25} . \quad (15)$$

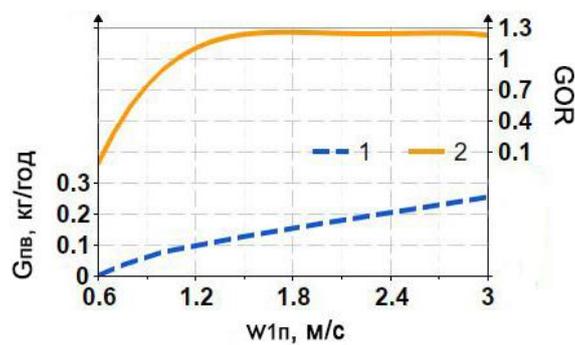


Рисунок 2. Залежність GOR і G_{ne} від w_{1n} : 1 – G_{ne} ; 2 – GOR

Результати моделювання. На рис. 2 показано зміну продуктивності установки G_{ne} та її енергетичної ефективності (GOR) від швидкості повітря на вході до зволожувача. Видно, що за $w_{1n} = 1,5$ м/с GOR набуває максимального значення і далі, із зростанням w_{1n} , не змінюється. Для дотримання плівкового режиму стікання води, швидкість руху повітря у зволожувачі необхідно підтримувати не вищою ніж 3 м/с [16]. За нижчих значень продуктивність установки буде зменшуватися (рис. 2). Так як, чим більша швидкість повітря у трубці, тим більша витрата повітря проходить через зволожувач. Унаслідок цього тепло- та масообмінні процеси інтенсифікуються і більше вологи буде передаватися до повітря у теплообміннику. У разі збільшення швидкості повітря понад 3 м/с, плівкове стікання води порушується і розпочинається одночасний рух рідини й повітря вгору. Такий режим характеризується відриванням і віднесенням з повітряним потоком бульбашок солоні води та стрибкоподібним зростанням гідравлічного опору [16]. Експлуатація установки за такого режиму призведе до забруднення дистилляту і збільшення затрат енергії. Таким чином приймаємо швидкість повітря у зволожувачі постійною і рівною 3 м/с. Тоді витрата повітря буде залежати лише від діаметра трубки.

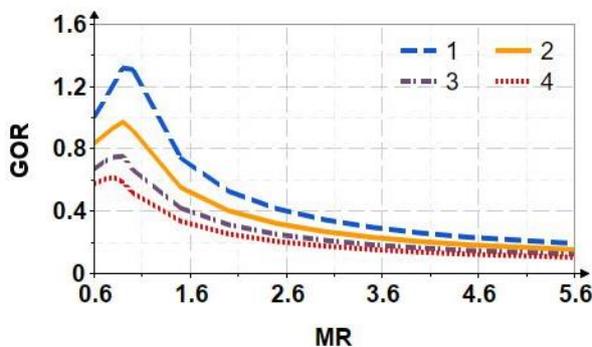


Рисунок 3. Залежність GOR від MR за $h = 1,5$ м:
1 – $d = 20$ мм; 2 – $d = 30$ мм;
3 – $d = 40$ мм; 4 – $d = 50$ мм

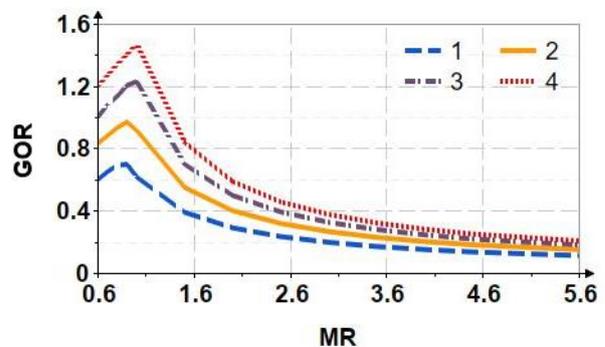


Рисунок 4. Залежність GOR від MR за $d = 30$ мм:
1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 1,5$ м;
3 – $h = 2$ м; 4 – $h = 2,5$ м

Вплив витрати солоної води (параметр MR) на енергетичну ефективність установки (GOR) залежно від d і h показано на рис. 3 та 4. Видно, що із збільшенням MR, значення GOR спочатку збільшується, досягає максимального значення і далі різко знижується. Наявність пікового значення GOR вказує на те, що для плівкового зволожувача за $MR=0,8\dots 1,0$ існує оптимальне співвідношення між продуктивністю G_{ne} і кількістю теплоти підведеної до солоної води у нагрівнику $Q_{наг}$. Отже, за таких умов, до водонагрівача необхідно підводити мінімальну кількість теплоти. Подальше зниження GOR обумовлено тим, що чим більша витрата води проходить через осушувач, тим менша температура цієї води на виході з апарата ($t_{2в}$, рис. 1). Відповідно необхідно більше теплоти підвести у нагрівнику, щоб догріти воду до заданої температури $t_{3в}$. Приймаємо для даного типу зволожувача оптимальне значення $MR = 1$, тобто $G_{св} = G_n$.

Зміну енергетичних характеристик опріснювальної установки від геометричних параметрів зволожувача показано на рис. 5 та 6. Чим більше значення d і h – тим більше прісної води можна отримати в установці (рис. 5). Більший діаметр дає змогу пропускати більше повітря, а за високої трубки покращується ефективність зволожувача (температура повітря на виході $t_{2н}$ буде наближатися до температури води на вході ($t_{3в}$, рис. 1). Все це сприяє збільшенню поглинання вологи повітрям у зволожувачі. Однак GOR за таких умов знижується (рис. 6) через збільшення теплової потужності нагрівника. Щоб уникнути підвищення $Q_{наг}$, необхідно підтримувати значення GOR більше 1 [6]. З рис. 6 видно, що таким умовам відповідає діаметр 20...30 мм за висоти трубки 2...2,5 м.

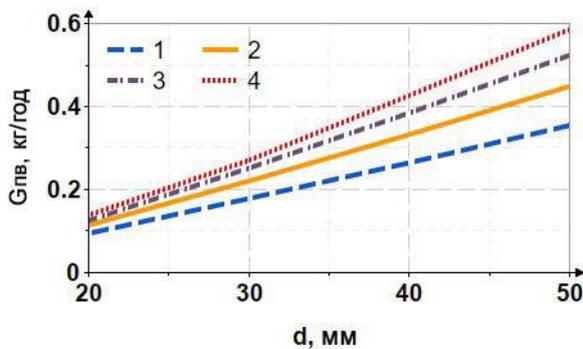


Рисунок 5. Залежність $G_{нев}$ від d :
 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 1,5$ м;
 3 – $h = 2$ м; 4 – $h = 2,5$ м

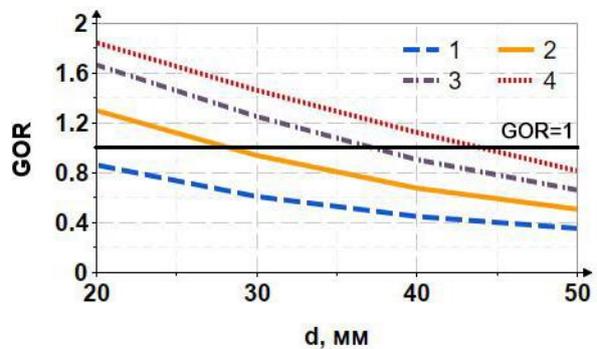


Рисунок 6. Залежність GOR від d :
 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 1,5$ м;
 3 – $h = 2$ м; 4 – $h = 2,5$ м

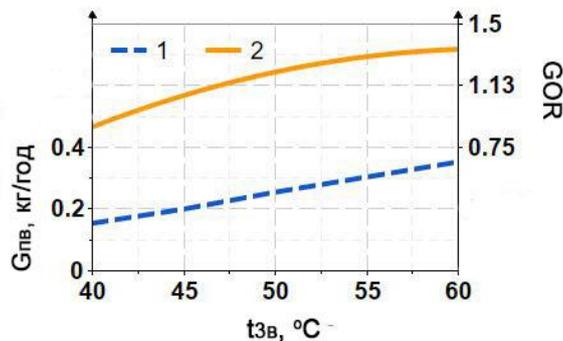


Рисунок 7. Залежність GOR і $G_{нев}$ від $t_{3в}$ за $d = 30$ мм і $h = 2$ м: 1 – $G_{нев}$; 2 – GOR

Розглянемо вплив параметрів зовнішнього повітря ($t_{1н}$ і $\omega_{1н}$) і температури солоної води на вході до зволожувача ($t_{3в}$) на зміну енергетичних характеристик опріснювальної установки. Як бачимо з рис. 7, чим вища температура $t_{3в}$, тим $G_{нев}$ і GOR більші. Це зумовлено тим, що збільшення температури $t_{3в}$ дозволяє підвищити поглинальну здатність зволожувача і отримати більшу продуктивність осушувача [6].

З рис. 8 та 9 видно, що температура ($t_{1н}$) і вологість ($\omega_{1н}$) зовнішнього повітря майже не впливають на продуктивність установки. Водночас значення GOR зростає із збільшенням $t_{1н}$ і $\omega_{1н}$. Такий результат пояснюється тим, що під час явного нагрівання і зволоження повітря стає легшим. Тоді, за незмінної швидкості у трубці ($w_{1н} = 3$ м/с) G_n буде зменшуватися. Відповідно зменшиться і $G_{св}$ (так як $G_n = G_{св}$). Як було зазначено вище, чим менша витрата $G_{св}$, тим менше теплоти необхідно підвести для нагріву води до температури $t_{3в}$. Слід зауважити, що такий вплив густини повітря на зміну GOR характерний у разі дотримання постійної швидкості $w_{1н}$. Однак, якщо контролювати безпосередньо витрату повітря, то значення GOR у разі зміни $t_{1н}$ і $\omega_{1н}$ залишиться постійним [6].

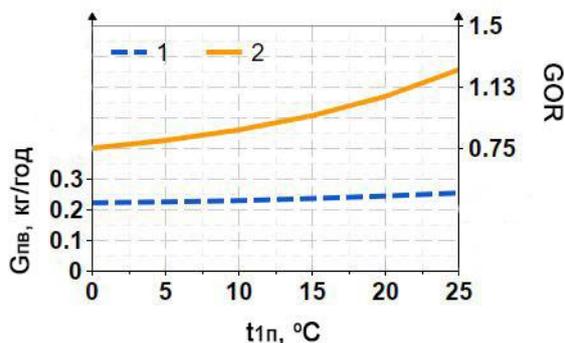


Рисунок 8. Залежність GOR і $G_{нев}$ від t_{1n} за $d = 30$ мм і $h = 2$ м: 1 – $G_{нев}$; 2 – GOR

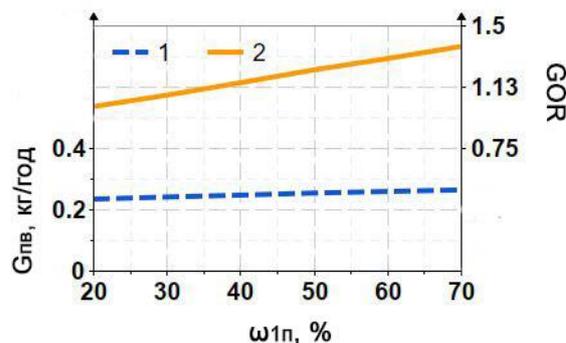


Рисунок 9. Залежність GOR і $G_{нев}$ від ω_{1n} за $d = 30$ мм і $h = 2$ м: 1 – $G_{нев}$; 2 – GOR

Порівняємо показники продуктивності плівкового тепломасообмінного апарата з іншими поширеними типами зволожувачів.

Багатострунний зволожувач висотою 0,4 м і площею поперечного перерізу 0,0032 м² досліджувався у праці [18]. Продуктивність зволожувача з пакувальним матеріалом визначалася у праці [14]. Теплообмінник мав висоту 0,332 м і площу поперечного перерізу 0,25 м². Пакувальний матеріал виготовлений із гофрованої целюлози, яка широко використовується в системах HDH [13,14]. Розпилювальний зволожувач складався із чотирьох поліпропіленових форсунок, які розпилювали солону воду у повітряний потік [12]. Апарат мав висоту 2 м і площу поперечного перерізу 0,07 м².

Для оцінки ефективності використовуємо годинну швидкість випаровування води на одиницю об'єму зволожувача. Для порівняння обиралися експерименти із приблизно однаковими швидкостями повітря, але швидкості солоної води при цьому відрізнялися:

- 0,6 мм/с для багатострунного зволожувача;
- 0,65 мм/с для зволожувача із пакувальним матеріалом;
- 1,41 мм/с для розпилювального зволожувача;
- 0,3 мм/с для нового плівкового зволожувача.

На рис. 10 показані результати проведеного порівняння. Видно, що новий зволожувач має кращу продуктивність у порівнянні із розпилювальним та багатострунним за близьких втрат тиску. Найбільшу продуктивність має зволожувач із пакувальним матеріалом. Однак втрати тиску при цьому більші у 10 разів. Переваги плівкового зволожувача пояснюються простою конструкцією трубки, яка забезпечує значну площу поверхні контакту фаз на одиницю об'єму із прямим і безперервним потоком повітря. При цьому плівковий зволожувач має найнижчу швидкість солоної води, а відповідно і найнижчі втрати тиску по воді.

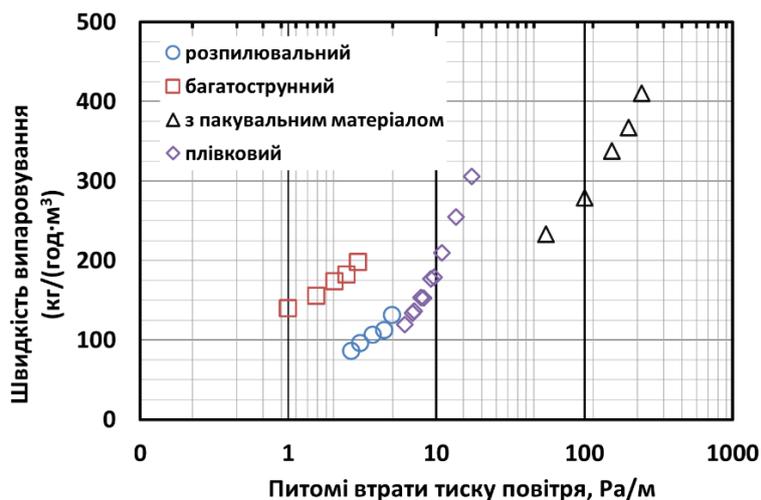


Рисунок 10. Порівняння ефективності плівкового зволожувача.

Висновки

Використання контактного теплообмінника плівкового типу як зволожувача HDH системи має ряд переваг. Ефективна робота такого апарату можлива за найнижчої витрати солоної води ($MR=1$) у порівнянні з іншими конструкціями ($MR=10\dots25$, [12-14,18]). Низька витрата води і відсутність

необхідності її розпилення через форсунки дає змогу отримати найнижчий гідравлічний опір. За приблизно однакової швидкості випаровування ($100-300 \text{ кг}/(\text{год}\cdot\text{м}^3)$) аеродинамічний опір апарату на порядок менший ніж у барботажних колон і зволожувачів із пакувальним матеріалом.

З експлуатаційної точки зору, найбільшу цікавість являє режим роботи плівкового зволожувача за $w_{ln} = 3 \text{ м/с}$ і $MR = 1$ ($G_{ce} = G_n$). Такі параметри дозволяють отримати максимальну продуктивність за мінімальних затрат енергії та запобігти потраплянню крапель забрудненої води до конденсату. Оптимальними геометричними розмірами трубки є діаметр $20\dots30 \text{ мм}$ та висота $2\dots2,5 \text{ м}$. За таких значень, коефіцієнт енергетичної ефективності GOR завжди більше 1.

Параметри зовнішнього повітря (t_{1n} і ω_{1n}) майже не впливають на продуктивність установки. Однак, у разі їх збільшення, коефіцієнт енергетичної ефективності GOR теж зростає. Відповідно зменшується кількість теплоти, яку необхідно підвести у нагрівнику для підігріву води до температури t_{3e} . Чим вища температура на вході до зволожувача t_{3e} , тим G_{ne} і GOR більші. Максимальне значення t_{3e} обмежене можливістю випадання солей у зволожувачі.

Подальші дослідження будуть спрямовані на порівняння термодинамічної та ексергетичної ефективності усіх типів HDH систем та проведення експериментальних досліджень гідродинаміки, тепло-і масообміну в плівковому зволожувачі та осушувачі для підвищення їх ефективності.

V. Sereda¹, PhD, Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4645-3123

Y. Liu¹, PhD student, ORCID 0000-0001-9535-4984

T. Podstievaia¹, PhD student, ORCID 0009-0000-5919-3650

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

HIGHLY EFFECTIVE DIRECT CONTACT HUMIDIFIER FOR THERMAL DESALINATION SYSTEM

The aim of the work is to increase the efficiency of thermal desalination systems with a humidification-dehumidification air cycle due to the reduction of electricity consumption. The most common designs of heat exchangers for air humidification have significant aerodynamic and hydraulic drops. To eliminate this disadvantage, it is proposed to use the internal volume of the vertical tube as an active heat and mass transfer zone during moisture evaporation from salt water to air. The operation of such desalination system has been mathematically modeled and its energy characteristics were determined. A special feature of the mathematical model is the consideration of heat and mass transfer equations for the humidifier and dehumidifier. The effective air velocity in the tube is 3 m/s. Effective operation of thermal unit with a film humidifier is possible then air mass flow is equal to the salt water flow. In this case, the geometric dimensions of the tube must be within the following limits: diameter 20...30 mm, height 2...2.5 m. The conducted mathematical modeling and obtained results give reasons to assert, that for the same rate of evaporation, the film heat exchanger has the lowest aerodynamic and hydrodynamic drops compared to other types of humidifiers. The use of such direct contact device will lead to a decrease in the electricity consumption necessary for salt water and air circulation in the humidification-dehumidification thermal installation.

Keywords: air humidification-dehumidification, direct contact heat exchanger, energy characteristics, mathematical modeling, thermal desalination.

References

1. A. Giwa, N. Akther, A. A. Housani, S. Haris, S. W. Hasen, "Recent advances in humidification dehumidification (HDH) desalination processes: improved designs and productivity." *Renewable and sustainable energy reviews*, vol.57, pp.929-944, May 2016. doi:10.1016/j.rser.2015.12.108.
2. S. A. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources." *Progress in energy and combustion science*, vol. 31, pp. 242-281, 2005. doi:10.1016/j.peccs.2005.03.001.
3. G. N. Tiwari, H. N. Singh, R. Tripathi, "Present status of solar distillation." *Solar Energy*, vol. 75, pp. 367-373, Nov 2003. doi:10.1016/j.solener.2003.07.005.
4. V. Belessiotis, S. Kalogirou, E. Delyannis. "Thermal solar desalination: methods and systems." [online] Elsevier Science; June 2016.
5. M. A. Elnasr, M. Kamal, H. Saad, M. Ehlhelaly, "Water desalination using solar energy: humidification and dehumidification principle." *Innovative energy&research*. Vol.4, pp.121. doi: 10.4172/2576-1463.1000121.
6. V.V. Sereda, A. S. Solomakha, N.O. Prytula, O.A. "Thermodynamic analysis of thermal desalination system with humidification-dehumidification cycle", *KPI Science News*, no. 4, pp. 105-112, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.4.250663.

7. V. V. Sereda, A. S. Solomakha, N. O. Prytula, N. O. Shvets, "Thermodynamic analysis of water desalination system with open and closed air cycle." Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences, Vol. 33(72), pp. 146-152, 2022. doi:10.32782/2663-5941/2022.6/25.
8. A.S. S. Mohamed, M. S. Ahmed, Hussein M. Marghrabir, A. G. Shahdy, "Desalination process using humidification–dehumidification technique: a detailed review." International journal of energy research., Vol. 45, 2020. doi: 10.1002/er.6111.
9. V. Patel, R. Patel, J. Patel, "Experimental and theoretical evaluation of bubbler humidifier for humidification–dehumidification water desalination system." Heat and Mass Transfer, 2019. doi:10.1007/s00231-019-02659-1.
10. E. Eder, M. Preibinger, "Experimental analysis of the humidification of air in bubble columns for thermal water treatment systems." Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 115, 2020. doi:10.1016/j.exptthermflusci.2020.110063.
11. M. Abu Elnasr, M. Kamal, H. Saad, M. Elhelaly, "Water Desalination using Solar Energy: Humidification and Dehumidification Principle," Innovative energy & research, Vol. 4(3), 2015. doi:10.4172/2576-1463.1000121.
12. S. Yanniotis, K. Xerodemas, "Air humidification for seawater desalination," Desalination, Vol. 158 (1) pp.313–319, Feb 2003. doi:10.1016/S0011-9164(03)00469-7.
13. G. Yuan, H. Zhang, "Mathematical modeling of a closed circulation solar desalination unit with humidification–dehumidification," Desalination, Vol. 205 (1–3), Vol. 156–162, 2007. doi:10.1016/j.desal.2006.03.550.
14. G. Yuan, Z. Wang, H. Li, X. Li, "Experimental study of a solar desalination system based on humidification–dehumidification process," Desalination, Vol. 277 (1-3), pp.92-98, Aug 2011. doi:10.1016/j.desal.2011.04.002.
15. C++ library of properties for 122 components. (2023). [Online]. Available: <http://www.coolprop.org>
16. P. Barabash, A. Solomakha, V. Sereda, et al. "Heat and mass transfer of countercurrent air-water flow in a vertical tube." Heat Mass Transfer, 2023. doi:10.1007/s00231-023-03342-2.
17. N. Minh Phu, N. Van Hap. "Influence of inlet water temperature on heat transfer and pressure drop of dehumidifying air coil using analytical and experimental methods," Case Studies in Thermal Engineering 18 (2020) 100581 doi:10.1016/j.csite.2019.100581.
18. Z. Zeng, A. Sadeghpour, Y. Sungtaek Ju, "A highly effective multi-string humidifier with a low gas stream pressure drop for desalination," Desalination, Vol. 449, pp. 91-100, 2019. doi:10.1016/j.desal.2018.10.017.

Надійшла: 02.05.2023
Received: 02.05.2023