

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

(назва журналу до 2019 р. – «Промышленная теплотехника»)

Том 46, № 2, 2024

Головний редактор – Сніжкін Ю.Ф.

Редакційна колегія:

Авраменко А.О. – заступник головного редактора
Басок Б.І.
Воробйов Л.Й.
Горобець В.Г.
Декуша Л.В.
Клименко В.М.
Круковський П.Г.
Кудря С.О.
Мислович М.В.
Письменний Є.М.
Фіалко Н.М.
Халатов А.А.
Шевченко О.Ю.
Шморгун В.В. – відповідальний секретар

Редакційна рада:

Балтренас П.Б. (Литва)
Ліграні П. (США)
Міховські М. (Болгарія)
Піоро І.Л. (Канада)
Сайред Н. (Великобританія)
Шевчук І.В. (Німеччина)

ЗМІСТ

ТЕПЛО- І МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ, ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУШІННЯ

Сорока П.В., Ступак О.С.

Цикл Майсоценка в процесах дистиляції технологічної
води та опріснення5

Авраменко А.О., Кобзар А.С.

Вплив наночастинок в газі на параметри прямої
ударної хвилі14

Sniezhkin Yu.F., Petrov P.I.

Research and development of heat technology of prebiotic
complex-forming powder production25

Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Турчина Т.Я.

Вивчення процесу екстрагування рослинної сировини в
проточному кавітаційному змішувачі статичного
типу32

Давиденко Б.В., Самойленко К.М.

Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики
сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як
об'єктів сушіння42

**Ободович О.М., Переяславцева О.О., Целень Б.Я.,
Резакова Т.А.**

Реалії сьогодення та перспективи майбутнього розвитку
водневої енергетики у світі та в Україні52

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Басок Б.І., Беспала Н.Г.

Стратегія відновлення багатоквартирних будівель
внаслідок військової агресії з урахуванням фактору
енергетичної ефективності62

Трибой О.В., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В.

Поточний стан та перспективи вирощування і
використання енергетичних рослин в Україні72

**Тарадай О.М., Яременко М.О., Павлюк Н.Ю.,
Дяченко С.В.**

Реконструкція систем опалення житлових будинків зі
збереженням діючих джерел теплоти83

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

**Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І.,
Гнєдаш Г.О., Мартюк О.В.**

Підвищення ефективності установок спалювання
палив з побутових відходів шляхом утилізації скидної
теплоти92

Білека Б.Д., Скляренко Є.В.

Покращення економічних і екологічних характеристик
когенераційних установок на базі теплових двигунів з
термохімічним методом очистки їх відпрацьованих
газів100

Крамар В.Г.

Економічна ефективність виробництва біочару та
твердого палива на основі біовугілля110

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

THERMOPHYSICS AND THERMAL POWER ENGINEERING

UKRAINIAN SCIENTIFIC JOURNAL

Published quarterly

(Founded in 1979, name until 2020 –
«Industrial Heat Engineering»)

Volume 46, № 2, 2024

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

A. Avramenko – Associated Editor
B. Basok
L. Vorobiov
V. Gorobec
L. Dekusha
V. Klimenko
P. Krukovsky
S. Kudrya
M. Myslovych
Ye. Pysmenny
N. Fialko
A. Khalatov
O. Shevchenko
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

P. Baltrenas (Lithuania)
P. Ligrani (USA)
M. Mihovski (Bulgary)
I. Pioro (Canada)
N. Syred (United Kingdom)
I. Shevchuk (Germany)

CONTENTS

HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES AND POWER UNITS, THEORY AND PRACTICE OF DRYING

Soroka P.V., Stupak O.S.

Maisotsenko cycle for process water distillation and
desalination5

Avramenko A.A., Kobzar A.S.

The action of nanoparticles in gas on the parameters of a
direct shock wave14

Sniezhkin Yu.F., Petrov P.I.

Research and development of heat technology of prebiotic
complex-forming powder production25

Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A., Turchyna T.Ya.

Study of the process of plant raw material extraction in a
static-type cavitation inline mixer32

Davydenko B.V., Samoilenko K.M.

Theoretical and experimental analysis of drying kinetics of
colloid capillary-porous materials as drying objects42

**Obodovych O.M., Pereiaslavl'tseva O.O., Tselen B.Y.,
Rezakova T.A.**

Today's realities and prospects of the future development
of hydro energy in the world and in Ukraine52

DISTRICT AND INDUSTRIAL HEAT POWER, RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, ENERGY EFFICIENCY

B. Basok, N. Bepala

Strategy for restoration of apartment buildings as a
consequence of military aggression, taking into account the
energy efficiency factor62

Tryboi O.V., Zheliezna T.A., Drahniiev S.V.

Current state and prospects for the growing and use of
energy crops in Ukraine72

**Taradai O.M., Yaremenko M.O., Pavliuk N.Y.,
Diachenko S.V.**

Reconstruction of heating systems in residential buildings
while maintaining existing heat sources83

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

**Fialko N.M., Navrodska R., Shevchuk S., Gnedash G.,
Martiuk O.**

Improving the plants efficiency of thermal incineration
household waste by recovering waste heat92

Bileka B.D., Sklyarenko E.V.

The improvement of the economic and environmental
characteristics of cogeneration plants based on heat engines
with the thermochemical method of cleaning their exhaust
gases100

Kramar V.G.

Economic efficiency of the production of biochar and solid
fuel based on biocal110

УДК 536.4

ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКА В ПРОЦЕСАХ ДИСТИЛЯЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ ТА ОПРІСНЕННЯ

Сорока П.В.¹, Ступак О.С.², доктор філософії¹аспірант, Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Марії Капніст, 2а, 03057, Україна²доктор філософії у галузі теплоенергетики, заст. директора Інституту технічної теплофізики НАН України, ст. наук. співр., e-mail: stupakalewka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-3115>.<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.1>

Проаналізовані технології і технічні рішення систем дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка. Наведено схеми процесів, устаткування та психрометричні діаграми. Показано, що М-цикл має потенціал для широкого практичного застосування.

Technologies and technical solutions for water distillation and desalination systems by Maysotsenko cycle were analyzed. Provided with diagrams of processes, installation and psychrometric diagrams. It is shown that the M-cycle has the potential for a wide range of practical applications.

Бібліографія 9, рис. 6.

Ключові слова: цикл Майсоценка, дистиляція води, опріснення води, схеми, психрометричні діаграми.

Вступ

Поверхня Землі на 70% вкрита водою, але 97% її є солоною і непридатною до вживання [1]. У зв'язку із швидкими темпами зростання населення світу відбувається значне зростання попиту на прісну воду, що призводить до її суттєвого дефіциту. Підвищення температури на Землі, високий рівень викидів парникових газів призвели до виникнення короточасних посух [2], за даними Організації Об'єднаних Націй частота кліматичних і погодних катастроф зросла в п'ять разів. Згідно з прогнозами, до 2025 року добова потреба у воді на людину збільшиться у 3...5 разів, і половина людства проживатиме в регіонах з нестачею води. Необхідність подолання глобального дефіциту води вимагає розробки нових наукових енергозберігаючих та екологічних рішень опріснення та дистиляції. В останні десятиліття відбувається суттєва інтенсифікація досліджень процесів опріснення та дистиляції води, серед яких домінують два основні напрями – мембранні і термічні технології. Мембранні технології включають ємнісну деіонізацію, мембранну дистиляцію, електродіаліз та напівпроникність у зворотному осмосі, а термічні – багатоступеневу дистиляцію, зволоження-осушення, парокомпресійну дистиляцію і багатоступеневу флеш-дистиляцію [3]. Основними вимогами до всіх методів є максимальна продуктивність прісної води, низьке споживання енергії, якомога менші витра-

ти на технічне обслуговування, мінімальний залишковий вміст солей в опрісненій воді. Крім цього, важливим фактором будь-якої опріснювальної установки є її екологічність. Оскільки використання викопного палива для опріснення призводить до негативного впливу на оточуюче середовище, значна увага зосереджується на використанні альтернативних і відновлюваних джерел енергії для систем опріснення та дистиляції.

Методи опріснення

На даний час розроблені, реалізовані та комерціалізовані різні методи опріснення. Серед термічних технологій розрізняють такі основні методи, як багатоступінчата флеш-дистиляція, багатоступенева дистиляція, адсорбційна дистиляція, дистиляція зволоження-осушення та інші. Ці технології вимагають підведення теплової енергії. Нетеплові технології включають мембранну фільтрацію, зворотний осмос, електродіаліз і стиснення парів, вони основані на споживанні електричної енергії.

На ринку опріснення та дистиляції вже існують добре розроблені технології. Серед технологій термічного опріснення – багатоступінчата флеш-дистиляція і багатоступенева дистиляція, а серед технологій нетермічного опріснення – зворотний осмос. Ці технології виробляють значну кількість опрісненої води (до 45...65% від коефіцієнта відновлення); однак їх експлуатація призводить до значних негативних екологічних наслідків. Наприклад, повідомлялося, що

приблизно 10000 тон нафти на рік використовується для щоденного виробництва 1000 кубічних метрів прісної води, це дає суттєвий внесок у викиди парникових газів. Так, багатоступінчата флеш-дистиляція виділяє 6,9 кг CO_2 на один м^3 води, для багатоступеневої дистиляції і зворотного осмосу цей показник становить відповідно 5,5 кг $\text{CO}_2/\text{м}^3$ води і 3,8 кг $\text{CO}_2/\text{м}^3$ води. Крім того, концентрований розсіл, що утворюється як побічний продукт, спричиняє локальні екологічні проблеми. У цьому контексті екологічно стійкі, недорогі рішення, засновані на екологічній безпеці в край необхідні для протистояння водним проблемам і одночасного забезпечення екологічної стабільності [3].

Перспективним рішенням може бути технологія адсорбційного опріснення (АО) через її здатність працювати з низькопотенційною відпрацьованою теплою, та з відновлюваними джерелами енергії, які поглинають теплоту з навколишнього середовища. Ці технології відповідають стандартам нульових викидів вуглецю (ZCE) з нульовим/мінімальним викидом розсолу (ZLD). В АО адсорбуючий матеріал є життєво важливим утворенням, яке може мати взаємно гідрофільні та гідрофобні властивості, що відповідають робочій температурі та тиску. Швидкість виробництва прісної води в основному залежить від адсорбційної здатності адсорбуючого матеріалу та кількості циклів, що здійснюються за день. Опріснення зволоженням-осушенням (ОЗО) також є екологічно безпечним, що має значний потенціал для видалення солі з морської води [3].

Одним із перспективних напрямів опріснення/дистиляції води є застосування циклу Майсоценка [4].

Схема опріснення показана на рис. 1. Потік повітря надходить до сухого каналу, і через послідовність отворів поступає до мокрого каналу. У сухому каналі відбувається охолодження, а у мокрому – зволоження за рахунок випаровування води із водяної плівки, яка змочує стінки каналу. Потім зволожений потік ділиться на дві частини, одна з яких надходить до конденсаційного каналу, де відбувається охолодження потоку і конденсація чистої води, яка накопичується у резервуарі. В останні роки цьому напрямку приділяється увага у зв'язку з невеликим енергоспоживанням такого методу опріснення/дистиляції.

Метою роботи є аналіз наявних схем і технічних рішень дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка, які на даний час описані в літературі.

Теоретичні дослідження опріснення на основі циклу Майсоценка

В роботі [2] виконано порівняльне дослідження на базі термодинамічного моделювання трьох методів випаровування солонуватої/солонної води: пряме випарне зволоження-осушення, непряме випарне зволоження-осушення, та випарне зволоження-осушення по циклу Майсоценка. Схеми та психрометричні діаграми процесів показані на рис. 2.

Схема опріснення з прямим випарним зволоженням-осушенням з психрометричною діаграмою показана на рис. 2 а, б. Процес відбувається при подачі теплого повітря (w_1) до мокрого каналу. Потік проходить через касету з проникним поглинаючим матеріалом, який тримає в своєму об'ємі солону воду. В якості поглинаючого матеріалу використовуються осикове во-

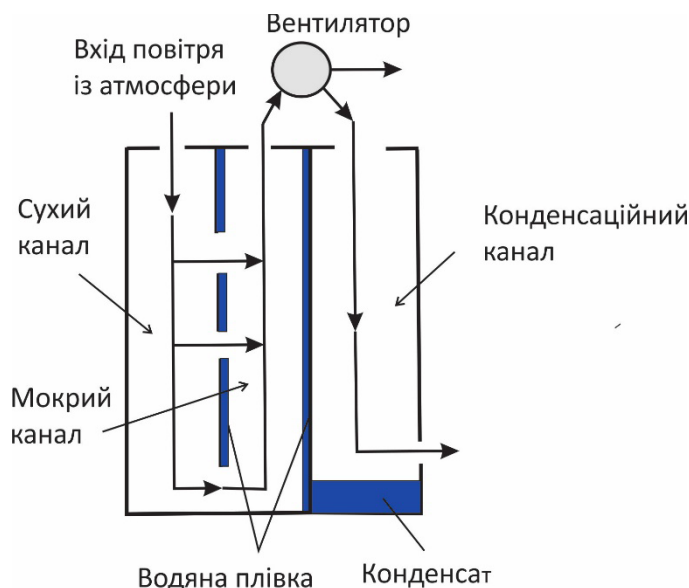


Рис. 1. Схема опріснення води по циклу Майсоценка [4]

локну, целюлозне волокно, джут, бавовняне волокно тощо. При контакті з касетою повітря зволожується і охолоджується до температури, близької до температури мокрого термометра. T_{wb} . Зволожене охолоджене повітря направляється до конденсатора/осушувача, де виробляється прісна вода. В кінці процесу стан прохолодного сухого повітря відповідає точці $d1$ на діаграмі.

Опріснювач з непрямым випарним зволоженням-осушенням відрізняється від попереднього варіанта тим, що він містить два вологих канали та один сухий канал, як показано на рис. 2 в, з. Холодопродуктивність непрямого процесу є функцією ефективності випаровування та температури по вологому термометру з потоку теплового повітря, що подається ($w1$).

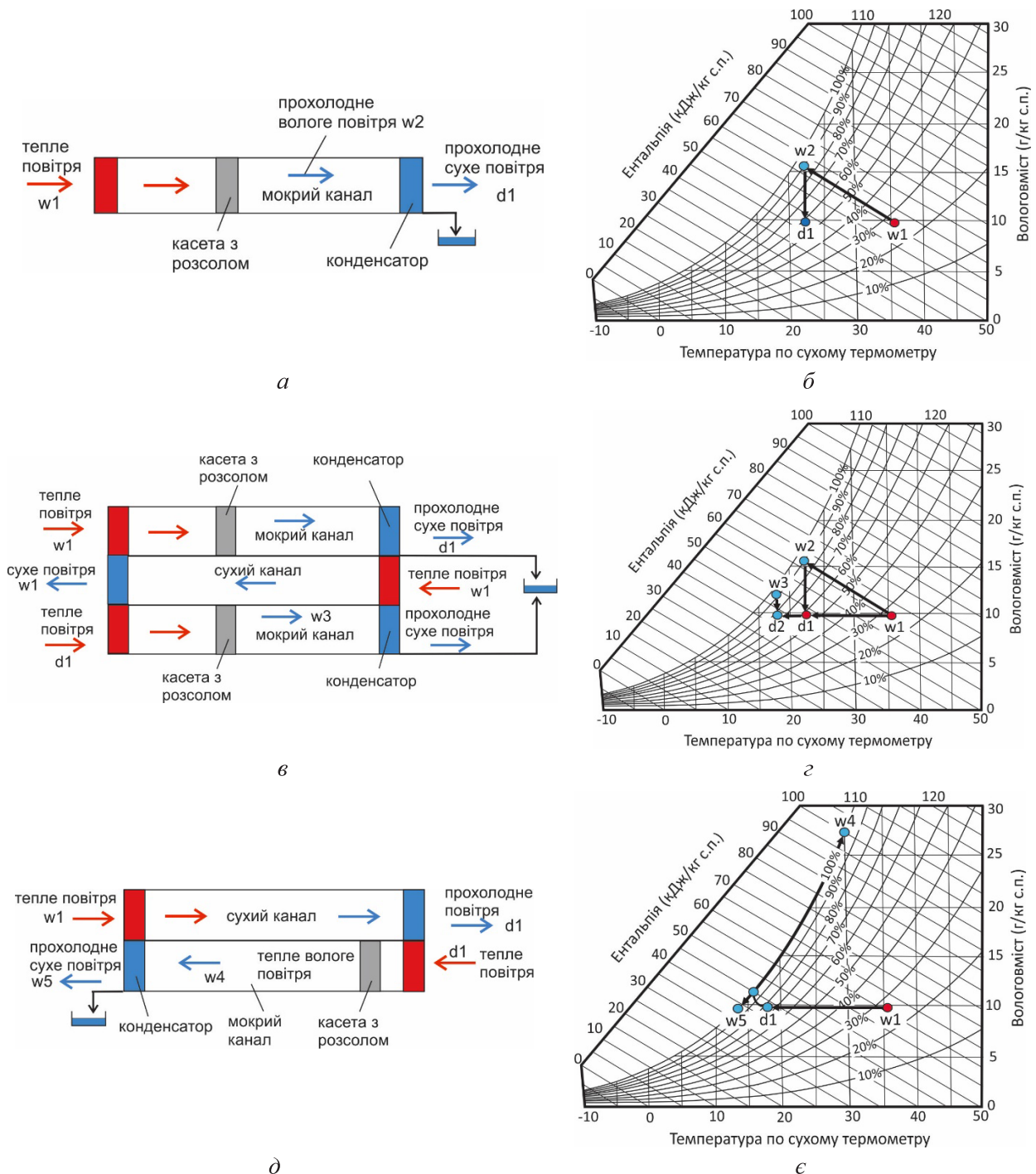


Рис. 2. Схеми та психрометричні діаграми процесів зволоження-осушення:

а, б – прямий цикл; в, з – непрямої цикл; д, е – цикл Майсоєнка

Завдяки теплообміну між стінками мокрого/сухого каналів відбувається охолодження в сухому каналі, тоді як у вологому каналі відбувається охолодження/зволоження, і цикл наближається відповідно до станів $d1$ і $w2$. У випадку непрямого охолодження стан $d1$ повітряного потоку знову направляється до другого вологого каналу, де відбувається охолодження та зволоження завдяки наявності касети з розсолем. В результаті відбувається додаткове зволожувальне охолодження, яке ще більше знижує температуру і наближається до станів повітря $w3$. Повітряні потоки $w2$ і $w3$ осушують для отримання прісної води.

Апарати по М-циклу створювались в основному для охолодження, і на даний час існує багато схем з двома, трьома, п'ятьма каналами, та навіть з їх більшою кількістю. Для цілей опріснення ці пристрої знаходяться в стадії розробки та дослідження. В роботі [2] два канали – сухий і вологий (рис. 2 д, е), розглядалися для термодинамічної оцінки системи. Вологий канал містить касету для розсолу, яка дозволяє зволожувати потік повітря, тоді як сухий канал головним чином відповідає за створення відчутного охолодження. У порівнянні з циклами прямого і непрямого зволоження-осушення цикл Майсоценка має потенціал для досягнення температури точки роси (T_{dew}) теплого повітря, що подається, однак наближення до точки роси зале-

жить від ряду факторів (довжини каналів, ефективності тепломасообміну та ін.). Процес опріснення по циклу Майсоценка починається з надходження теплого повітря в стані ($w1$) у сухий канал. В ідеальному випадку за рахунок конвективного перетворення тепла з вологого каналу повітря $w1$ помітно охолоджується і досягає точки роси T_{dew} , перебуваючи в стані $d1$. Повітря $d1$ -стану знову направляється у вологий канал. Завдяки наявності касети з розсолем у вологому каналі повітря стає зволоженим і досягає стану $w4$, як показано на психрометричному циклі на рис. 2 є, підтримуючи при цьому 100% відносну вологість. Після завершення процесу зволоження тепле вологе повітря ($w4$) спрямовується до конденсатора/осушувача. Потім осушена водяна пара конденсується, а повітряний потік у стані $w4$ може бути використаний для охолодження.

Відповідно, до результатів дослідження, опріснювальна установка по циклу Майсоценка є найменш енергоємною з трьох розглянутих схем.

В ряді робіт досліджувалось застосування відновлюваних джерел енергії. В роботі [5] виконано термодинамічний аналіз системи опріснення на основі зволоження-осушення з використанням М-циклу та сонячного водонагрівача. Схему установки наведено на рис. 3 а. Вона складається з апарату по М-циклу, сонячного водонагрівача, насоса та резервуара солоної

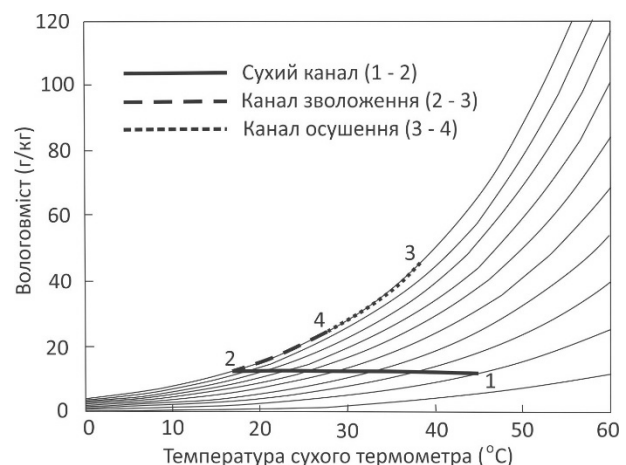
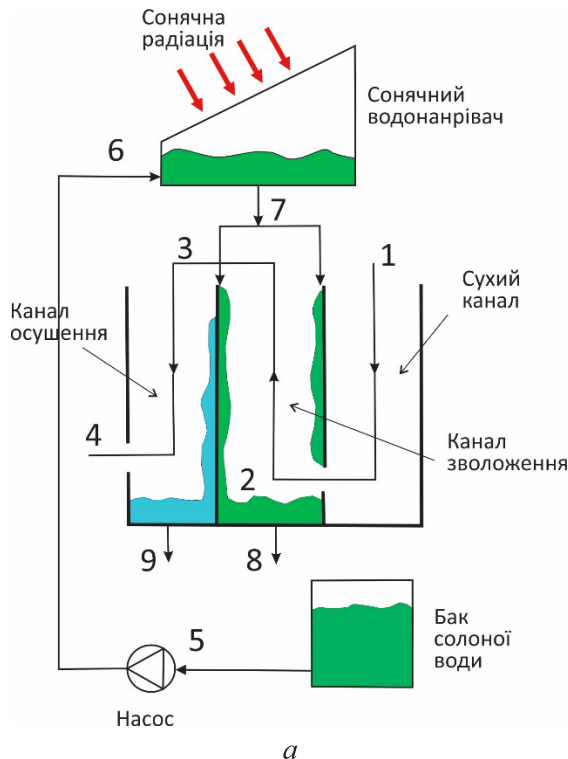


Рис. 3. Схема (а) та психрометрична діаграма (б) системи опріснення на основі М-циклу за даними роботи [5]

води. Апарат по М-циклу складається з трьох каналів: сухого каналу, каналу зволоження (випаровування) і каналу осушення (конденсації). Повітря надходить у точку 1, проходить через сухий канал, надходить у канал зволоження у точку 2, вступає в контакт із нагрітою солоною водою та зволожує повітря в точці 3. Потім вологе повітря надходить у канал осушення, де водяна пара конденсується, а опріснена вода виходить у точці 9, тоді як відпрацьоване повітря виходить у точці 4. Солона вода з резервуару в точці 5 перекачується до сонячного водонагрівача, де вона надходить у точку 6 і нагрівається до бажаної температури в точці 7. Попередньо нагріта сольова вода в точці 7 надходить у канал зволоження так, щоб повітря вступало в контакт з нею, аби стимулювати випаровування чи зволоження. У точці 8 підвищується солоність солоної води, яка виходить у вигляді розсолу. Конденсована опріснена вода відбирається в точці 9.

Психрометрична діаграма для М-циклу показана на рис. 3 б. Діаграма ілюструє три різні процеси повітряного каналу. В сухому каналі (1-2), де точка стану 1 є температурою навколишнього середовища 45°C з відносною вологістю 20 %, повітря охолоджується до точки роси. Слід відмітити, що охолодження до точки роси є теоретичною межею, яка на практиці ніколи не досягається. Процес випаровування відбувається в каналі зволоження (2-3), що підвищує коефіцієнт вологості. Нарешті, насичене вологе повітря конденсується в каналі осушення (3-4). В роботі сформульовані основні фактори, які впливають на продуктивність системи опріснення та споживання енергії. Показано, що посилення вихідної потужності та питоме споживання енергії показують протилежну тенденцію для всіх розглянутих випадків. Максимальна масова продуктивність опрісненої води становить $22,3 \text{ кг/год}$, що відбувається при температурі повітря на вході 45°C , вологовмісту 5 г/кг , температурі попередньо підігрітої солоної води на вході 60°C і солоності на вході 35 г/кг . Питоме енергоспоживання складає $0,23 \text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ води.

В роботі [6] виконано математичне моделювання гібридної установки охолодження житлового будинку та опріснення на основі циклу Майсоценка з фотоелектричними/термальними сонячними колекторами. Конфігурація запропонованої системи включає фотоелектричну/теплову систему, систему охолодження повітря на основі рециркуляційного осушувача, вдосконалену циклом Майсоценка, і систему зволоження-осушення-опріснення. Система опріснення використовується для отримання дистильованої води, яка накопичується в резервуарі. Навколишнє повітря

у секції регенерації проходить через цикл Майсоценка та охолоджується до температури точки роси. Повітря нагрівається теплообмінником повітря-повітря для отримання здатності поглинати вологу у більшому обсязі. Оскільки ця установка є гібридною, питоме споживання саме опріснення в роботі не вказане.

В роботі [7] запропонували та математично змоделювали опріснювальну установку зволоження-осушення, що працює від сонячної енергії та використовує зволожувач повітря на основі циклу Майсоценка (рис. 4).

Солонна вода з резервуара рециркулює і нагрівається в сонячному колекторі. Підігріта вода подається в випарник-зволожувач М-циклу. Конструкція випарника пластинчатого типу складається з двох повітряних каналів: сухого та вологого. Атмосферне повітря надходить в канали випарника: у мокрому каналі воно зволожується за рахунок випаровування підігрітої води. В даній конструкції випарника робоче повітря із сухого каналу через пористу пластину поступає до мокрого каналу по всій довжині. Цей процес збільшує потенціал поглинання вологи робочим повітрям у мокрому каналі, оскільки надходження свіжого повітря змінює умови змішування; і, як наслідок, вологе повітря має тенденцію поглинати більше вологи. На відміну від традиційної схеми каналів М-циклу, яка передбачає теплообмін через стінку, у новій конструкції є необхідною теплова ізоляція між каналом сухого повітря та каналом вологого повітря, для запобігання нагріванню сухого повітря. Конденсат збирається із зволоженого повітря у теплообміннику змішувального типу. Вода із теплообмінника далі поступає в резервуар, для використання її теплоти. В роботі розроблено та розв'язано математичну модель, яка включає моделювання всіх елементів установки.

Порівняльне дослідження показало, що запропонована система забезпечує на 30% вищу продуктивність прісної води, на 46% більший коефіцієнт відновлення та на 11% більший коефіцієнт посилення вихідної потужності порівняно з системою опріснення на основі зволожувача прямої схеми. Питоме енергоспоживання виробництва води становить $0,3 \text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ води.

Експериментальні дослідження опріснення на основі циклу Майсоценка

В роботі [8] розглянуто систему непрямого випаровування для відновлення та повторного використання стічних вод на основі М-циклу. Була розроблена та протестована установка дистиляції води. Блок дистиляції води складався з трьох суміжних каналів: сухого, випарного та конденсаційного (рис. 5). Навколишнє повітря охолоджується в сухому каналі, створюючи рушійну силу для конденсації води в конденсаційному каналі.

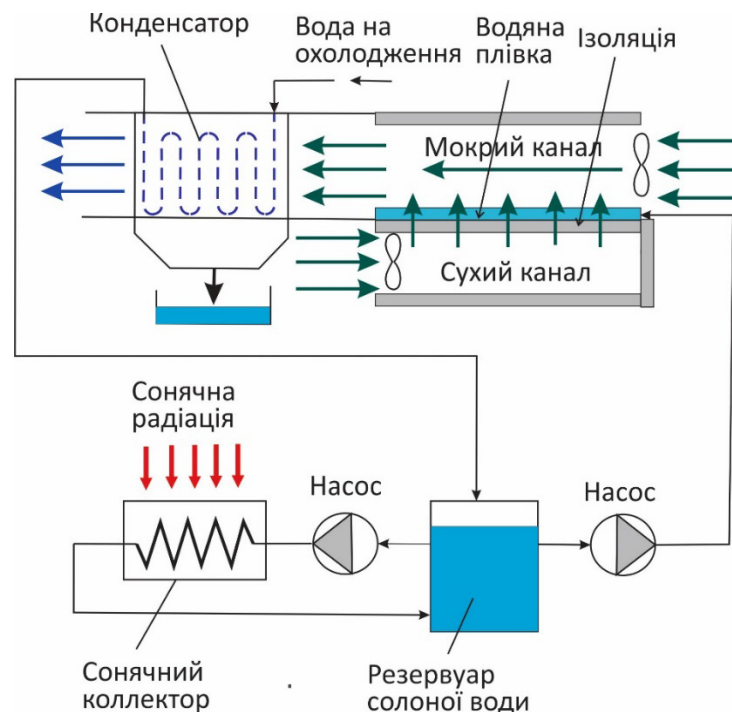


Рис. 4. Система опріснення на основі М-циклу [7]

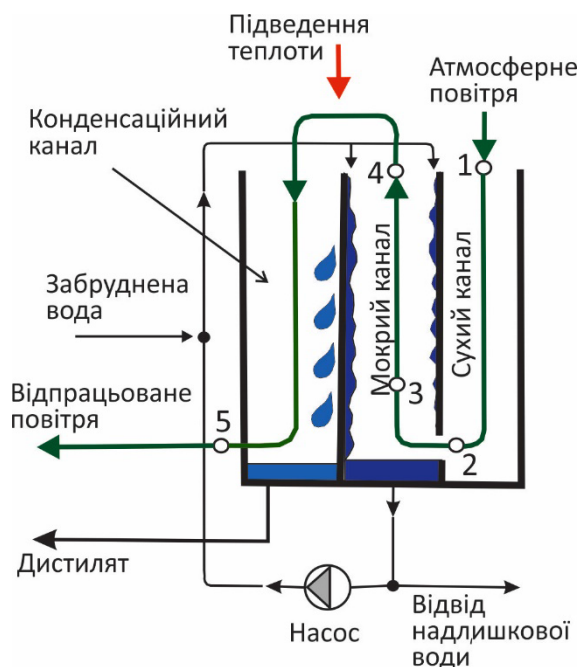


Рис. 5. Схема (а) і психрометрична діаграма (б) дистиляції стічних вод по М-циклу [8]

Глибоке охолодження (нижче вологого термометра) навколишнього повітря в сухому каналі також забезпечує вищу швидкість випаровування у випарному каналі, так що більше стічної води може випаровуватися в каналі, що призводить до більшої конденсації води в сусідньому конденсаційному каналі.

Відпрацьовану теплоту можна використовувати для попереднього підігріву насиченого повітря або стічної води для підвищення ефективності процесу дистиляції. Чим вища температура насиченого повітря або стічної води у верхній частині пристрою, тим більше конденсату (дистильованої води) може утворюватися. В ідеалі

кількість утвореного конденсату дорівнює масі води, що випарується у випарному каналі. Рушійна сила для процесів випаровування та конденсації характеризується різницею між температурою гарячого насиченого повітря у верхній частині блоку та належною точковою температурою навколишнього повітря.

Попередні експерименти на дистиляційній установці дозволили оцінити нову концепцію непрямого випаровування точки роси для відновлення стічних вод. Експерименти показали дуже незначний потік конденсату або його відсутність, якщо насичене повітря чи стічні води не отримували тепла. Попереднє нагрівання до 93 °С насиченого повітря, що надходить із виходу випарного каналу, створюючи вологе повітря, трохи збільшить потік водяного конденсату (до 2-10 % випареної води). Попереднє нагрівання стічної води до 60 °С збільшило потік водяного конденсату до 56 % випареної води.

В роботі [9] представлена пілотна установка для одночасного вироблення холоду за допомогою М-циклу, та опріснення морської води. Схема установки показана на рис. 6.

Повітря із вологого каналу додатково насичується вологою при більш високій температурі в апараті аерозольного типу, і потім поступає до осушувача, в якому відбувається конденсація вологи за рахунок безконтакт-

ного теплообміну зі свіжою морською водою. Морська вода підігрівається спочатку в осушувачі, а потім в нагрівачі за рахунок зовнішнього джерела теплоти. Установка пройшла тестові випробування. Атмосферне повітря охолоджувалось до температури нижче 25° С, а температура вологого повітря на виході із мокрого каналу була в діапазоні 5...10 °С. Продуктивність по прісній воді складала 25...125 л/год, що виявилось вищим за інші установки при тих же вхідних умовах.

Висновки

Проаналізовані технології і технічні рішення систем дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка, які на даний час описані в літературі. Наведено схеми процесів, устаткування та психрометричні діаграми. Показано перспективність застосування М-циклу для дистиляції та опріснення води. Даний метод має високу продуктивність з відносно малими енергозатратами, що дозволяє його застосовувати з відновлюваними джерелами енергії. Також він задовольняє вимогам до якості очищеної води – більше 99%, що є на рівні найбільш поширених сучасних методів очищення, таких як зворотній осмос та адсорбційне очищення. При цьому застосування відновлювальних джерел енергії в зв'язі з даним методом дозволяє задовольнити сучасні вимоги до екологічної безпеки, зокрема, що стосується викидів

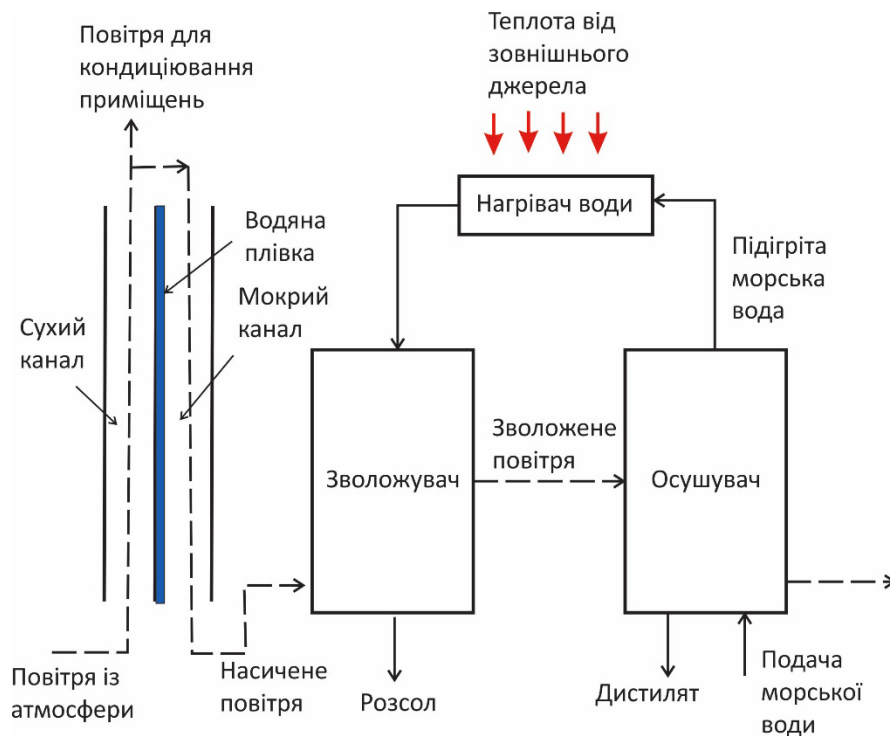


Рис. 6. Схема гібридної установки для кондиціонування приміщень та опріснення морської води

парникових газів. Важливим аспектом є застосування утилізації та регенерації відпрацьованої теплоти, що суттєво впливає на питоме енергоспоживання.

На даний час метод опріснення та дистиляції води із застосуванням М-циклу достатньо добре вивчений з теоретичної точки зору, проте необхідні додаткові дослідження в частині використання сучасних матеріалів в конструкції опріснювача.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Musie W., Gonfa G.*, Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon* (2023) 9 (8) e18685, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
2. *Mohammed M.; Alqahtani N.K.; Asfahan H.M.; Sultan M.* Evaporation-Assisted Humidification–Dehumidification Cycles for Desalination Application in Tropical and Subtropical Regions. *Water* (2023), 15, 1125. <https://doi.org/10.3390/w15061125>.
3. *Pandelidis D., Cicho A., Pacak A., Drąg P., Drąg M., Worek W., Cetin S.* Water desalination through the dewpoint evaporative system. *Energy Conversion and Management* (2021) 229, 113757 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113757>
4. *US Patent 8613839* (2013) Water desalination method and apparatus. Maisotsenko V., Gilan L., Gilan A., Gilan R.
5. *Mansoor Abdul Aziz, Jie Lin, František Mikšík, Takahiko Miyazaki, Kyaw Thu.* The second law analysis of a humidification-dehumidification desalination system using M-cycle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (2022) 52, Part B, 102141, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102141>
6. *Nan Wang, Dongxuan Wang, Jungang Dong, Haitao Wang, Renliang Wang, Limin Shao, Yiping Zhu.* Performance assessment of PCM-based solar energy assisted desiccant air conditioning system combined with a humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* (2020) 496, 114705. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114705>
7. *Tariq R., Nadeem Xamán A.S., Bassam X.*, An innovative air saturator for humidification-dehumidification desalination application. *Applied Energy* (2018) 228, 789–807, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.135>.
8. *Chudnovsky Y. Kozlov A.* Integrated Wastewater Recovery and Reuse via Waste Heat Utilization. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). (2013) V.8. DOI:10.1115/IMECE2013-66646.
9. *Qian Chen, Muhammad Burhan, Muhammad Wakil Shahzad, Doskhan Ybyraiymkul, Faheem Hassan Akhtar, Kim Choon Ng.* Simultaneous production of cooling and freshwater by an integrated indirect evaporative cooling and humidification-dehumidification desalination cycle. *Energy Conversion and Management* (2020) 221, 2020, 113169, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113169>

MAISOTSENKO CYCLE FOR PROCESS WATER DISTILLATION AND DESALINATION

Soroka P.V.¹, Stupak O.S.²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

¹*postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine*

²**Stupak O. S.**, PhD in the field of Thermal and power engineering, deputy director for scientific and organizational work of the Institute of engineering thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the Institute of engineering thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, phone: (098) 446–22–35; e-mail: stupakalewka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-3115>.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.1>

Search for new solutions for water distillation and desalination is one of the most important challenges facing scientists around the world. One of the promising methods of distillation and desalination of water is the use of the Maisotsenko cycle – a thermodynamic process, which use a psychrometric renewed energy available from the latent heat of water, which is evaporated into the air by using the M-cycle, both energy savings and environmental benefits can be achieved. In this work, the technologies and technical solutions for distillation and water desalination systems according to the Maisovaluation cycle described in the literature are analyzed. Provided with diagrams of processes, installation and psychrometric diagrams. According to literature data, energy-saving distillation/desalination of water from stagnation of the M-cycle becomes 0.2...0.4 kW·year/kg of water, which can compete with other desalination methods. The M-cycle has been shown to have the potential for a wide range of practical installations, while being characterized by a simpler installation design. References 9, figures 6.

Key words: Maisotsenko cycle, water distillation, water desalination, schemes, psychrometric charts.

1. Musie W., Gonfa G., Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon* (2023) 9 (8) e18685, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>

2. Mohammed M.; Alqahtani N.K.; Asfahan H.M.; Sultan M. Evaporation-Assisted Humidification–Dehumidification Cycles for Desalination Application in Tropical and Subtropical Regions. *Water* (2023), 15, 1125. <https://doi.org/10.3390/w15061125>.

3. Pandelidis D., Cicho A., Pacak A., Drag P., Drag M., Worek W., Cetin S. Water desalination through the dew-point evaporative system. *Energy Conversion and Management* (2021) 229, 113757 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113757>

4. US Patent 8613839 (2013) Water desalination method and apparatus. Maisotsenko V., Gilan L., Gilan A., Gilan R.

5. Mansoor Abdul Aziz, Jie Lin, František Mikšík, Takahiko Miyazaki, Kyaw Thu. The second law analysis of a humidification-dehumidification desalination system using M-cycle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (2022) 52, Part B, 102141, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102141>

6. Nan Wang, Dongxuan Wang, Jungang Dong, Haitao Wang, Renliang Wang, Limin Shao, Yiping Zhu. Performance assessment of PCM-based solar energy assisted desiccant air conditioning system combined with a humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* (2020) 496, 114705. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114705>

7. Tariq R., Nadeem Xamán A.S., Bassam X., An innovative air saturator for humidification-dehumidification desalination application. *Applied Energy* (2018) 228, 789–807, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.135>.

8. Chudnovsky Y. Kozlov A. Integrated Wastewater Recovery and Reuse via Waste Heat Utilization. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). (2013) V.8. DOI:10.1115/IMECE2013-66646.

9. Qian Chen, Muhammad Burhan, Muhammad Wakil Shahzad, Doskhan Ybyraiymkul, Faheem Hassan Akhtar, Kim Choon Ng. Simultaneous production of cooling and freshwater by an integrated indirect evaporative cooling and humidification-dehumidification desalination cycle. *Energy Conversion and Management* (2020) 221, 2020, 113169, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113169>

Отримано 01.03.2024

Received 01.03.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 532.536

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК В ГАЗІ НА ПАРАМЕТРИ ПРЯМОЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ

Авраменко А.О.¹, член-кореспондент НАН України, Кобзар А.С.²

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, Київ, Україна, 03057

¹Заступник директора інституту, професор, tgetu.ittf@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>²Аспірант, andrykobzar@gmail.com., ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5598-6864><https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.2>

Використовуючи аналітичний аналіз, вирішена задача проходження газу з твердими наночастинками через пряму ударну хвилю. Задача розв'язана за допомогою підходу Ренкіна-Гюгоніо. Виявлено вплив концентрації наночастинок в газі, теплоємності та густини матеріалу наночастинок на параметри ударної хвилі.

Using analytical analysis, the problem of passing gas with solid nanoparticles through a direct shock wave was solved. The problem is solved using the Rankine-Hugoniot approach. The influence of the concentration of nanoparticles in the gas, the heat capacity, and the density of the material of the nanoparticles on the parameters of the shock wave was revealed.

Бібл. 21.

Ключові слова: ударна хвиля, скачок ущільнення, наночастинки, швидкість потоку. a – швидкість звуку; a_s^* – критична швидкість звуку; c_p – ізобарна теплоємність; h^p – ентальпія; k – показник адіабати; p – тиск; R_i – універсальна газова постійна; T – температура; U – швидкість; V – об'єм; ρ – густина чистої рідини; Φ – концентрація наночастинок.

Індекси:

1 – параметри перед ударною хвилею;

2 – параметри за ударною хвилею;

 p – відноситься до наночастинок.**Вступ**

На сьогодні явище ударних хвиль має широкий спектр реалізації – від аерокосмічної галузі до медицини та харчової промисловості, гірничої справи, турбомашинобудування. Незважаючи на величезний об'єм досліджень в галузі ударних хвиль, нові технології вимагають нових досліджень. Особливий інтерес представляє контроль і керування переходом надзвукової течії в дозвукову і навпаки, оскільки при такому переході поле течії суттєво змінюється внаслідок розриву параметрів течії та виникнення ударної хвилі, яка сама має різну форму. Крім того, такі течії супроводжуються утворенням вихорів, значними зсувними напруженнями, теплообміном та іншими особливостями.

На даний момент не існує єдиної методики, яка б дозволяла керувати ударною хвилею в різних геометричних об'єктах, де потік газу рухається в широкому діапазоні швидкостей.

Основні аспекти сучасного стану знань по управлінню ударною хвилею, її розвиток, згасання, а

також вплив на різні елементи обладнання викладено в [1]. Розвиток течій газу з ударними хвилями можна успішно моделювати за допомогою чисельних методів [2 – 5], методів молекулярної динаміки для прогнозування структури течії на молекулярному рівні [6], як аналітично [7], так і експериментально.

Приклади чисельного моделювання розвитку ударної хвилі в мікроканалах і вузьких трубках трьома різними методами висвітлено в роботі [8, 9]. Результати моделювання добре узгоджуються між собою в діапазоні чисел Кнудсена до $Kn = 0,5$. Показано, що швидкість ударної хвилі зменшується швидше при більш розрідженій течії.

Показано, що швидкість поширення ударної хвилі зменшується при низьких тисках у вузькому каналі, хоча швидкість поширення також може зростати швидше у вузькому каналі порівняно з більш широким, коли хвилі стиснення, які посилюють ударну хвилю діють на вході в канал.

Як відомо, течії з наночастинками в теплотехніці стають все більш цікавими через їхню здатність

інтенсивніше знімати теплові навантаження з термонапружених поверхонь [10]. Нанорідини також добре зарекомендували себе як мастила [11]. Огляд літератури, присвяченої дослідженню ударних хвиль у газових потоках, не виявив жодних досліджень, пов'язаних із газовими потоками з наночастинками. У той же час існує досить багато досліджень ударних хвиль в запиленних потоках [12-15], найближчий до нашого дослідження області.

Вираз для повної енергії, переданої слабкою ударною хвилею в потоці запиленого газу, отримано в [12]. Метод групи Лі використовувався для розв'язання задачі про поширення ударної хвилі в роботах [8, 14, 16].

Виконано аналіз впливу масової концентрації пилових частинок, густин твердих частинок і чистого середовища, а також вплив зазначених параметрів на формування ударної хвилі. Показано, що за наявності твердих частинок ударна хвиля поширюється на меншу відстань і сповільнюється. Зменшення швидкості ударної хвилі в запиленних потоках показано також у [14]. Автори вимірювали швидкості твердих частинок у зоні релаксації за допомогою лазерного доплерівського вимірювача швидкості. На основі експериментальних даних отримано співвідношення для гідродинамічного опору, яке описує прискорення частинки в зоні релаксації. У теоретичному дослідженні [11] отримано співвідношення, які дозволяють досліджувати нестационарну зміну параметрів теплообміну, ефекти збільшення масової концентрації твердих частинок у суміші, а також співвідношення, які дають змогу оцінити вплив зміни густини твердих частинок і чистого середовища на параметри течії в області за ударною хвилею.

Отже, останні десятиліття демонструють зростання інтересу до проблем теплообміну в потоках з наночастинками, які мають місце в різних елементах енергетичного, біомедичного, електронного, хімічного та харчового обладнання [17-19]. Ця тенденція супроводжується розвитком технологій, що використовують вплив ударних хвиль. Тому в даній роботі ми зосередимося на аналітичному моделюванні параметрів течії газу з нормальною ударною хвилею за наявності твердих наночастинок в елементі простору необмеженому стінками.

Математична модель

Процес проходження газу через нормальну ударну хвилю можна описати модифікованою системою рівнянь Ренкіна – Гюгонію. Ця система включає наступні рівняння:

збереження маси

$$\rho_{1\Sigma} U_1 = \rho_{2\Sigma} U_2, \quad (1)$$

збереження імпульсу (відсутність тертя)

$$p_1 + \rho_{1\Sigma} U_1^2 = p_2 + \rho_{2\Sigma} U_2^2, \quad (2)$$

збереження сумарної ентальпії

$$h_{1\Sigma} + \frac{U_1^2}{2} = h_{2\Sigma} + \frac{U_2^2}{2}. \quad (3)$$

Тут індекс "Σ" позначає фізичні властивості нанорідин (тобто газів з наночастинками).

Для потоку нанорідин наведені рівняння необхідно доповнити умовою збереження концентрації наночастинок

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi, \quad (4)$$

а також рівняння для модифікованої густини та ізобарної теплоємності

$$\rho_\Sigma = (1 - \varphi)\rho + \varphi\rho_p, \quad (5)$$

$$(c\rho)_\Sigma = c\rho(1 - \varphi) + c_p\rho_p\varphi, \quad (6)$$

які враховують внесок наночастинок у відповідні фізичні властивості нанорідин.

Ударна адіабата

Очевидно, що за умови нульової концентрації наночастинок $\varphi = 0$, рівняння (1) – (6) зводяться до класичної системи Ренкіна – Гюгонію [20, 21], використовуючи рівняння стану ідеального газу

$$p = \rho R_i T, \quad (7)$$

разом із співвідношенням Майєра

$$R_i = c \frac{k-1}{k}. \quad (8)$$

Перепишемо із використанням $k = c/c_v$ (де c_v – ізохорна теплоємність), представимо ентальпію у такому вигляді:

$$h_{1\Sigma} = c_{1\Sigma} T_1 = \frac{c\rho_1(1-\varphi) + c_p\rho_p\varphi}{\rho_1(1-\varphi) + \rho_p\varphi} T_1 =$$

$$\frac{(1-\varphi) + \frac{c_p\rho_p}{c\rho_1}\varphi}{(1-\varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1}\varphi} \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{c_{1\Sigma}}{c} \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = C_1 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1}, \quad (9)$$

$$h_{2\Sigma} = c_{2\Sigma} T_2 = \frac{c\rho_2(1-\varphi) + c_p\rho_p\varphi}{\rho_2(1-\varphi) + \rho_p\varphi} T_2 =$$

$$\frac{\frac{\rho_2}{\rho_1}(1-\varphi) + \frac{c_p\rho_p}{c\rho_1}\varphi}{\frac{\rho_2}{\rho_1}(1-\varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1}\varphi} \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} = \frac{c_{2\Sigma}}{c} \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} = C_2 \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2}, \quad (10)$$

$$\text{де } C_1 = \frac{(1-\varphi) + \frac{c_p\rho_p}{c\rho_1}\varphi}{(1-\varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1}\varphi}, \quad C_2 = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1}(1-\varphi) + \frac{c_p\rho_p}{c\rho_1}\varphi}{\frac{\rho_2}{\rho_1}(1-\varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1}\varphi}.$$

Тепер рівняння (3) можна записати у такій формі:

$$C_1 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{U_1^2}{2} = C_2 \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{U_2^2}{2}. \quad (11)$$

Враховуючи рівняння (1), можна перетворити рівняння (2) на

$$p_1 - p_2 = \rho_{1\Sigma} U_1 (U_2 - U_1) \quad (12)$$

і помножити це рівняння на множник

$$\frac{V_2 + V_1}{\rho_{1\Sigma} V_1} = \frac{1}{\rho_{1\Sigma}} + \frac{1}{\rho_{2\Sigma}}. \quad (13)$$

В результаті маємо:

$$(p_1 - p_2) \left(\frac{1}{\rho_{1\Sigma}} + \frac{1}{\rho_{2\Sigma}} \right) = U_2^2 - U_1^2. \quad (14)$$

З рівняння (11) випливає що

$$U_2^2 - U_1^2 = \frac{2k}{k-1} \left(C_1 \frac{p_1}{\rho_1} - C_2 \frac{p_2}{\rho_2} \right). \quad (15)$$

Прирівняння рівнянь (14) та (15) дає:

$$(p_1 - p_2) \left(\frac{1}{\rho_{1\Sigma}} + \frac{1}{\rho_{2\Sigma}} \right) = \frac{2k}{k-1} \left(C_1 \frac{p_1}{\rho_1} - C_2 \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (16)$$

чи

$$\left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right) \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{1}{R_1} = \frac{2k}{k-1} \left(C_1 - C_2 \frac{p_2}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \right), \quad (17)$$

$$\text{де } R_1 = (1 - \varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1} \varphi, \quad R_2 = (1 - \varphi) + \frac{\rho_p}{\rho_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \varphi.$$

Розв'язуючи рівняння (17) відносно p_2/p_1 можна отримати:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\frac{p_2}{p_1} \left(\frac{p_2}{p_1} + 1 + \left(2 \frac{\rho_p}{\rho_1} - \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \varphi + k \left(\frac{p_2}{p_1} + 1 + \left(1 + \left(2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 3 \right) \frac{p_2}{p_1} \right) \varphi + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \left(\frac{p_p}{p_1} - \frac{p_2}{p_1} \right) \varphi^2 \right) \right)}{\frac{p_2}{p_1} \left(k + 1 - \frac{p_2}{p_1} (k-1) \right) + \left(2k \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} + \frac{p_2}{p_1} \left(k \left(\frac{p_2}{p_1} - 3 \right) + 2 \frac{\rho_p}{\rho_1} - \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \varphi \right) + 2k \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - \frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{p_p}{p_1} - 1 \right) \varphi^2}. \quad (18)$$

Рівняння (18) є умовою стрибка тиску Ренкіна-Гюгоніо для нанорідин, яке називають також рівнянням ударної адіабати. У разі чистих рідин з $\varphi = 0$, $c_p = 0$, $\rho_p = 0$, рівняння (18) перетворюється на відому умовою стрибка тиску Ренкіна-Гюгоніо для звичайних (чистих) середовищ [20, 21].

Рівняння асимптоти (тобто аргумент) для рівняння (18) має наступну форму:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\left(1 + \varphi \left(2 \frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) + k \left(1 - \varphi \left(3 + 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \right) + \sqrt{S} \right)}{(k-1)(1-\varphi)}, \quad (19)$$

де

$$S = 8 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} k (k-1) \varphi (1-\varphi) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi \right) + \left(k + 1 + \left(2 \frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 - 3k \right) \varphi - 2k \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi^2 \right)^2. \quad (20)$$

Для звичайної (чистої) рідини $\varphi = 0$, $c_p = 0$, $\rho_p = 0$, тоді як рівняння (19) зводиться до класичного рішення [20, 21].

У випадку повітря ($k = 1,4$), проходячи через удар, воно не може збільшити свою густину більш ніж у шість разів [20, 20]. Результати розрахунку показують, що асимптота граничного збільшення густини повітря сама по собі має екстремум (максимум) залежно від концентрації наночастинок. Спочатку зі збільшенням концентрації наночастинок асимптота зміщується в область більших значень аргументу ρ_2/ρ_1 . Цей зсув може бути дуже значним. Очевидно, це можна віднести до того, що збільшення концентрації наночастинок збільшує загальну густину нанорідини, що спричиняє зменшений стрибок тиску в нормальній ударній хвилі. Іншими словами, нанорідина демонструє більш високу стисливість, ніж відповідна рідина чистої основи.

Таким чином, через наявність наночастинок раптове підвищення тиску в нанорідині, що проходить через ударну хвилю, не може бути таким сильним, як у відповідній чистій рідині для тих самих значень ρ_2/ρ_1 . Іншими словами, збільшення концентрації наночастинок призводить до слабшого стрибка тиску в нормальній ударній хвилі. Збільшення густини наночастинок викликає якісно подібний ефект. При високій концентрації наночастинок ($\varphi > 0,1$) їх абсолютні значення практично перестають впливати на ударні адіабатичні умови. Пройшовши екстремум (максимум) концентрації наночастинок при $\varphi > 0,5$, нанорідина демонструють режими, коли аргумент ρ_2/ρ_1 в асимптоті зменшується.

Знайдемо залежність між швидкістю потоку до ударної хвилі та після неї. Перетворимо рівняння (12) з урахуванням рівняння (1)

$$U_1 - U_2 = \frac{p_2}{\rho_{2\Sigma} U_2} - \frac{p_1}{\rho_{1\Sigma} U_1}. \quad (21)$$

Далі ми перетворимо рівняння (11) для загальної ентальпії. Для цього ми виразимо ентальпію через швидкість звуку a

$$h_1 = C_1 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = C_1 \frac{a_{s1}^2}{k-1}. \quad (22)$$

Зміна швидкості

Швидкість звуку в чистому базовому середовищі потрібно виражати через швидкість звуку в нанорідині. Візьмемо похідну від рівняння (5) щодо тиску

$$\frac{d\rho_\Sigma}{dp} = (1-\varphi) \frac{d\rho}{dp} + \varphi \frac{d\rho_p}{dp} = (1-\varphi) \frac{d\rho}{dp}. \quad (23)$$

Тут розглядається постійна густина твердої фази (тобто наночастинок). Тоді можна отримати вираз для швидкості звуку в нанорідині з рівняння (22)

$$a_{s\Sigma} = \frac{a_s}{\sqrt{1-\varphi}}. \quad (24)$$

Беручи до уваги рівняння (22), можна переписати рівняння (11) у такій формі:

$$C_1 \frac{a_{s1\Sigma}^2 (1-\varphi)}{k-1} + \frac{U_1^2}{2} = \text{const}. \quad (25)$$

Щоб знайти константу в рівнянні (25), перепишемо це рівняння для критичних умов, тобто коли швидкість потоку дорівнює швидкості звуку. Тоді маємо з рівняння (25)

$$C_1 \frac{a_{s\Sigma}^2 (1-\varphi)}{k-1} + \frac{U_1^2}{2} = C_1 \frac{(a_{s\Sigma}^*)^2 (1-\varphi)}{k-1} + \frac{(a_{s\Sigma}^*)^2}{2} = (a_{s\Sigma}^*)^2 \left(C_1 \frac{1-\varphi}{k-1} + \frac{1}{2} \right). \quad (26)$$

Порівнюючи рівняння (22) та (26), можна отримати:

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{k-1}{C_1 k} \left[(a_{s\Sigma}^*)^2 \left(C_1 \frac{1-\varphi}{k-1} + \frac{1}{2} \right) - \frac{U_1^2}{2} \right]. \quad (27)$$

Як варіант, можна вивести

$$\frac{p_2}{\rho_2} = \frac{k-1}{C_2 k} \left[(a_{s\Sigma}^*)^2 \left(C_2 \frac{1-\varphi}{k-1} + \frac{1}{2} \right) - \frac{U_2^2}{2} \right]. \quad (28)$$

Далі ми перетворимо рівняння (21) з урахуванням рівнянь (27) та (28), що дає

$$U_1 - U_2 = \frac{1}{U_2} \frac{p_2}{\rho_2} \frac{1}{R_2} - \frac{1}{U_1} \frac{p_1}{\rho_1} \frac{1}{R_1} = \frac{k-1}{k} \left(\frac{1}{R_2 C_2} \left[\frac{(a_{s\Sigma}^*)^2}{U_2} \left(C_2 \frac{1-\varphi}{k-1} + \frac{1}{2} \right) - \frac{U_2}{2} \right] - \frac{1}{R_1 C_1} \left[\frac{(a_{s\Sigma}^*)^2}{U_1} \left(C_1 \frac{1-\varphi}{k-1} + \frac{1}{2} \right) - \frac{U_1}{2} \right] \right). \quad (29)$$

Далі, вводячи поняття коефіцієнта швидкості

$$\lambda = \frac{V}{a_{s\Sigma}^*} \quad (30)$$

можна перетворити рівняння (29) наступним чином

$$\lambda_1 - \lambda_2 - \frac{k-1}{2k} \left(\frac{\lambda_1}{R_1 C_1} - \frac{\lambda_2}{R_2 C_2} \right) = \frac{1}{R_2 C_2 \lambda_2} \left(C_2 \frac{1-\varphi}{k} + \frac{k-1}{2k} \right) - \frac{1}{R_1 C_1 \lambda_1} \left(C_1 \frac{1-\varphi}{k} + \frac{k-1}{2k} \right). \quad (31)$$

Для базової чистої рідини ($\varphi = 0$, $C_1 = 1$, $R_1 = 1$), рівняння (31) зводиться до співвідношення Прандтля

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1. \quad (32)$$

Тепер необхідно виключити співвідношення густин ρ_2/ρ_1 з рівняння (31), щоб знайти зв'язок між коефіцієнтами швидкості як функцію параметрів лише рідини. Для цього ми перепишемо рівняння (1) у такій формі:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\rho_{2\Sigma}}{\rho_{1\Sigma}} = \frac{\rho_2 R_2}{\rho_1 R_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (33)$$

Виразимо співвідношення ρ_2/ρ_1 з рівняння (33) через коефіцієнти λ_1 і λ_2 і підставимо отримане співвідношення в рівняння (31). Як результат, ми можемо отримати квадратне рівняння для λ_1 або λ_2 . Вирішивши його, можна знайти бажане співвідношення швидкостей потоку до та після ударної хвилі.

$$\begin{aligned}
\lambda_1 = & \left(1 + \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} (1 + \lambda_2^2) - 3 \right) \varphi - 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. k \left(1 + \varphi \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 + \lambda_2^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} + 2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} (\varphi - 1) - 2 \frac{\rho_p}{\rho_1} \varphi \right) \right) \right) \right) \right) + \\
& \left(\left(4 \lambda_2^2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - \frac{\rho_p}{\rho_1} \right) (\varphi - 1)^2 \varphi \left(1 + k + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right. \right. \\
& \left. \left(1 + k \left(1 + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \right) + \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) + \left(1 + \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right)^2 \right. \\
& \left. \left(1 + \left(\left(\frac{\rho_p}{\rho_1} (1 + \lambda_2^2) - 3 \right) \varphi - 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi^2 + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. k \left(1 + \left(-1 - 2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} \lambda_2^2 + \frac{\rho_p}{\rho_1} + \lambda_2^2 \frac{\rho_p}{\rho_1} \right) \varphi + 2 \lambda_2^2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - \frac{\rho_p}{\rho_1} \right) \varphi^2 \right) \right) \right)^{1/2} / \\
& \left. \left(2 \lambda_2^2 (1 - \varphi) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + k \left(1 + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \right) \right) \right).
\end{aligned} \tag{34}$$

Розрахунки показали, що збільшення концентрації наночастинок приблизно до $\varphi \approx 0.1$ зменшує співвідношення λ_1/λ_2 . При подальшому збільшенні концентрації наночастинок співвідношення λ_1/λ_2 зростає. Ця залежність λ_1/λ_2 від φ має екстремум, як значення збільшення асимптотичної густини ударної хвилі. Однак точки екстремуму для цих залежностей не збігаються, оскільки коливання щільності та теплоємності наночастинок мало впливає на форму залежності λ_1/λ_2 від φ .

Іноді зручно оцінювати інтенсивність ударної хвилі у відносній формі залежності для λ_1/λ_2 або λ_2/λ_1 . Щоб побудувати таку залежність, перепишемо рівняння (31)

$$\Lambda - 1 - \frac{k-1}{2k} \left(\frac{\Lambda}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_2 C_2} \right) = \frac{1}{R_2 C_2 \lambda_2^2} \left(C_2 \frac{1-\varphi}{k} + \frac{k-1}{2k} \right) - \frac{1}{R_1 C_1 \Lambda_1 \lambda_2} \left(C_1 \frac{1-\varphi}{k} + \frac{k-1}{2k} \right), \tag{35}$$

де $\Lambda = \lambda_1/\lambda_2$ – коефіцієнт відносної швидкості. Рішення цього рівняння виглядає так:

$$\begin{aligned}
\Lambda = & \left(\left(1 + \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} + \lambda_2^2 \frac{\rho_p}{\rho_1} - 3 \right) \varphi - 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi^2 + \right. \right. \\
& \left. k \left(1 + \varphi \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 + \lambda_2^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} + 2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - (\varphi - 1) - 2 \right. \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left(1 + \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + \lambda_2^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} - 3 \right) \varphi - 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi^2 + \frac{\rho_p}{\rho_1} \varphi \right) \right) \right) \right) + \\
& \left(\left(4 \lambda_2^2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - \frac{\rho_p}{\rho_1} \right) (\varphi - 1)^2 \varphi \left(1 + k + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1 \right) \varphi \right) \left(1 + 2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1 \right) + \right. \right.
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\left(1 + \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1\right) \varphi^2\right) \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + \lambda_2^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} - 3\right) \varphi - 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1\right) \varphi^2 + k \left(1 + \left(-1 - 2 \frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} \lambda_2^2 + \frac{\rho_p}{\rho_1} + 2 \lambda_2^2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - \frac{\rho_p}{\rho_1}\right) \varphi^2\right)\right)^2\right)^{1/2} / \left(2 \lambda_2^2 (1 - \varphi) \left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_1} - 1\right)\right) \left(1 + k \left(1 + 2 \left(\frac{c_p \rho_p}{c \rho_1} - 1\right) \varphi\right)\right)\right).$$

Розрахунок на основі (36) показує, що зі збільшенням концентрації наночастинок інтенсивність ударної хвилі спочатку зменшується, а потім збільшується, пройшовши точку мінімуму.

Більше того, можна перетворити рівняння (35), використовуючи числа Маха (Ma) замість коефіцієнтів швидкості. Для цього ми перепишемо рівняння (26) у безрозмірній формі

$$C_1 \frac{1 - \varphi}{k - 1} \frac{1}{Ma_1^2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{\lambda_1^2} \left(C_1 \frac{1 - \varphi}{k - 1} + \frac{1}{2} \right). \quad (37)$$

Звідси можна знайти залежність між коефіцієнтом швидкості та числом Маха

$$\lambda_1 = Ma_1 \sqrt{\frac{k - 1 + 2 C_1 (1 - \varphi)}{(k - 1) Ma_1^2 + 2 C_1 (1 - \varphi)}}. \quad (38)$$

Для чистого базового газу ($\varphi = 0$, $C_1 = 1$) рівняння (35) зводиться до класичного відношення [15, 16]

$$\lambda_1 = Ma_1 \sqrt{\frac{k + 1}{2 + (k - 1) Ma_1^2}}. \quad (39)$$

Використовуючи рівняння (38) та подібне рівняння для величин λ_2 та Ma_2 , можна переписати рівняння (38) у такій формі:

$$Ma_1 = A \sqrt{\frac{2 C_1 (1 - \varphi)}{(1 - A^2) (k - 1) + 2 C_1 (1 - \varphi)}}, \quad (40)$$

де A – права частина рівняння (40), в якому коефіцієнт швидкості λ_2 замінюється числом Маха Ma_2 відповідно до рівняння (39).

Висновки

Аналітичне розв'язання задачі про проходження потоку газу з наночастинками через нормальну ударну хвилю використовуючи модифіковані умови Ренкіна – Гюгоніо показало, що асимптота граничного збільшення густини газу має екстремум (максимум) залежно від концентрації наночастинок. Спочатку зі збільшенням концентрації наночастинок асимптота зміщується в область великих значень ρ_2/ρ_1 . Це обумовлено тим, що збільшення концентрації наночастинок збільшує загальну густину нанорідини і тим самим послаблює стрибок тиску в ударній хвилі. Стрибок тиску в нанорідині, що проходить через ударну хвилю не може бути таким сильним, як у базовій чистій рідині при тих же значеннях ρ_2/ρ_1 . Це означає, що збільшення концентрації наночастинок спричиняє слабший стрибок тиску в нормальній ударній хвилі. Збільшення густини наночастинок має такий самий ефект. При відносно високих концентраціях ($\varphi > 0,1$) його значення практично перестає впливати на умови Ренкіна – Гюгоніо в ударній хвилі. При $\varphi > 0,5$ асимптота граничного збільшення густини повітря може зменшуватися.

Робота профінансована в рамках програми наукових проектів НАН України (№ 6541230) «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» 2023–2025 (1230). Проект: «Розробка технічних засад нової високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України».

ЛІТЕРАТУРА

1. Ligrani P.M., McNab E.S., Collopy H., Anderson M. Marko S.M. Recent investigations of shock wave effects and interactions // *Advances in Aerodynamics*. – 2020. Vol. 2, № 4, p. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42774-020-0028-1>
2. Guang Zhang Heuy Dong Kim. Numerical simulation of shock wave and contact surface propagation in micro shock tubes. *Journal of Mechanical Science and Technology* // 2015, Vol. 29, p.1689–1696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0341-5>

3. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Renormalization group model of large-scale turbulence in porous media // *Transport in Porous Media*. 2006, Vol. 63, p. 175-193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-005-4425-z>
4. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. Modeling of flows in a microchannel based on the Boltzmann lattice equation // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012, Vol. 85, p. 65-72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>
5. Ho-Keun Kang, Michihisa Tsutahara, Ki-Deok Ro, Young-Ho Lee. Numerical Simulation of Shock Wave Propagation using the Finite Difference Lattice Boltzmann Method // *KSME International Journal*. 2002, Vol. 16, No.10, p. 1327-1335. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02983840>
6. Valentini P., Tump P.A., Zhang C., Schwartzentruber T.E. Molecular Dynamics Simulations of Shock Waves in Mixtures of Noble Gases // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2013, Vol. 27; Iss. 2, p. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.T3903>
7. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section // *Journal of Porous Media*. 2007, 11 (3), p. 241-246. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v11.i3.20>
8. Zeitoun D.E., Burtschell Y., Graur I.A., Ivanov M.S., Kudryavtsev A.N., Bondar Y.A. Numerical simulation of shock wave propagation in microchannels using continuum and kinetic approaches // *Shock Waves*. 2009, Vol. 19, p. 307–316. <https://doi.org/10.1007/s00193-009-0202-1>
9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip flow in a channel occupied by a hyperporous medium. *Journal of Porous Media*. 2007, 10(5), p. 435-442. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v10.i5.20>
10. Choi S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*. ASME. 1995, Vol.66, p. 99–105.
11. Chaudhary J.P., Singh L.P. Analytical Study of Weak Shock Waves in Gas with dust particles // *National Academy Science Letters*, 2020, Vol. 43, p. 643-646. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40009-020-00932-0>
12. Chadha M., Jena J. Self-similar solutions and converging shocks in a non-ideal gas with dust particles. // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2014, Vol. 65, p. 164-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2014.05.013>
13. Vishwakarma J.P., Nath G A self-similar solution of shock propagation in a mixture of a non-ideal gas and small solid particles // *Meccanica*. 2009. Vol. 44, p.239–254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-008-9166-y>
14. Sommerfeld M. The unsteadiness of shock waves propagating through gas-particle mixtures // *Experiments in Fluids*. 1985, Vol. 3, p. 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00265101>
15. Vishwakarma J. P., Nath G., Singh K.K. Propagation of shock waves in a dusty gas with heat conduction, radiation heat flux and exponentially varying density // *Physica Scripta*, 2008, Vol. 78, N.3. p. 035402. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/78/03/035402>
16. A.A. Avramenko, I.V. Shevchuk, S. Abdallah, D.G. Blinov, S. Harmand, A.I. Tyrinov. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach // *J. Molecular Liquids*, 2016. N.223, p. 156 – 164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.08.038>
17. A.A. Avramenko, I.V. Shevchuk, A.A. Moskalenko, P.N. Lohvynenko, Yu.Yu. Kovetska Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles, *Applied Thermal Engineering*. 2018. 139. P. 87 – 98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.113>
18. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity // *Phys. Fluids*. 2016, N. 28, p. 034104-1 - 034104-16. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4942896>
19. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Blinov D.G. Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate // *Appl. Therm. Eng.* 2014. N.73, V.1, p. 389–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.070>
20. Rankine, W.J.M.. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbances // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1870. N.160, pp. 277–288. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1870.0015>
21. Hugoniot, H. Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)]. *Journal de l'École Polytechnique*, 1887, N.57, pp. 3–97. (in French).

THE ACTION OF NANOPARTICLES IN GAS ON THE PARAMETERS OF A DIRECT SHOCK WAVE

Avramenko A.A.¹, Kobzar A.S.²

¹Corresponding Member of the NAS of Ukraine Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine, tgetu.ittf@gmail.com, ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>

²Postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine. andrykobzar@gmail.com, ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5598-6864>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.2>

Summary

Today, the phenomenon of shock waves has a wide range of implementation. Despite the huge volume of research in the field of shock waves, new technologies require new research. Special interest is in the control and management of the transition of a supersonic flow to a subsonic flow and vice versa. During such transition the flow changes significantly due to the breaking of the flow parameters and the appearance of a shock wave, which has a different shape. In addition, such currents are accompanied by the formation of eddies, significant shear stresses, heat exchange and other features.

There is no single technique, that would allow controlling the shock wave in various geometric objects, where the gas flow moves in a wide range of velocities.

Therefore, in this paper, we will focus on the analytical modeling of gas flow parameters with a normal shock wave in the presence of solid nanoparticles in an element of space unbounded by walls. The process of gas passing through a normal shock is mathematically described by a modified system of Rankine-Hugoniot equations.

Analytical solution of the problem of passage of a gas flow with nanoparticles through a normal shock wave using modified Rankine-Hugoniot conditions showed that the pressure jump in the nanogas in the shock wave could not be as strong as in the basic pure gas. This means that increasing the concentration of nanoparticles causes a weaker pressure jump in the normal shock wave.

References 21.

Key words: shock wave, pressure jump, nanoparticles, flow velocity.

1. Ligrani P.M., McNab E.S., Collopy H., Anderson M. Marko S.M. Recent investigations of shock wave effects and interactions // *Advances in Aerodynamics*. – 2020. Vol. 2, № 4, p. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42774-020-0028-1>

2. Guang Zhang Heuy Dong Kim. Numerical simulation of shock wave and contact surface propagation in micro shock tubes. *Journal of Mechanical Science and Technology* // 2015, Vol. 29, p.1689–1696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0341-5>

3. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Renormalization group model of large-scale turbulence in porous media // *Transport in Porous Media*. 2006, Vol. 63, p. 175-193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-005-4425-z>

4. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. Modeling of flows in a microchannel based on the Boltzmann lattice equation // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012, Vol. 85, p. 65-72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>

5. Ho-Keun Kang, Michihisa Tsutahara, Ki-Deok Ro, Young-Ho Lee. Numerical Simulation of Shock Wave Propagation using the Finite Difference Lattice Boltzmann Method // *KSME International Journal*. 2002, Vol. 16, No.10, p. 1327-1335. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02983840>

6. Valentini P., Tump P.A., Zhang C., Schwartzentruber T.E. Molecular Dynamics Simulations of Shock Waves in Mixtures of Noble Gases // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2013, Vol. 27; Iss. 2, p. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.T3903>

7. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section // *Journal of Porous Media*. 2007, 11 (3), p. 241-246. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v11.i3.20>

8. Zeitoun D.E., Burtschell Y., Graur I.A., Ivanov M.S., Kudryavtsev A.N., Bondar Y.A. Numerical simulation of shock wave propagation in microchannels using continuum and kinetic approaches // *Shock Waves*. 2009, Vol. 19, p. 307–316. <https://doi.org/10.1007/s00193-009-0202-1>

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip flow in a channel occupied by a hyperporous medium. *Journal of Porous Media*. 2007, 10(5), p. 435-442. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v10.i5.20>

10. Choi S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*. ASME. 1995, Vol.66, p. 99–105.

11. Chaudhary J.P., Singh L.P. Analytical Study of Weak Shock Waves in Gas with dust particles // *National Academy Science Letters*, 2020, Vol. 43, p. 643-646. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40009-020-00932-0>

12. *Chadha M., Jena J.* Self-similar solutions and converging shocks in a non-ideal gas with dust particles. // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2014, Vol. 65, p. 164-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2014.05.013>
13. *Vishwakarma J.P., Nath G.* A self-similar solution of shock propagation in a mixture of a non-ideal gas and small solid particles // *Meccanica*. 2009. Vol. 44, p.239–254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-008-9166-y>
14. *Sommerfeld M.* The unsteadiness of shock waves propagating through gas-particle mixtures // *Experiments in Fluids*. 1985, Vol. 3, p. 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00265101>
15. *Vishwakarma J. P., Nath G., Singh K.K.* Propagation of shock waves in a dusty gas with heat conduction, radiation heat flux and exponentially varying density // *Physica Scripta*, 2008, Vol. 78, N.3. p. 035402. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/78/03/035402>
16. *A.A. Avramenko, I.V. Shevchuk, S. Abdallah, D.G. Blinov, S. Harmand, A.I. Tyrinov.* Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach // *J. Molecular Liquids*, 2016. N.223, p. 156 – 164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.08.038>
17. *A.A. Avramenko, I.V. Shevchuk, A.A. Moskalenko, P.N. Lohvynenko, Yu.Yu. Kovetska* Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles, *Applied Thermal Engineering*. 2018. 139. P. 87 – 98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.113>
18. *Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity // *Phys. Fluids*. 2016, N. 28, p. 034104-1 - 034104-16. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4942896>
19. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Blinov D.G.* Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate // *Appl. Therm. Eng.* 2014. N.73, V.1, p. 389–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.070>
20. *Rankine, W.J.M.* On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbances // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1870. N.160, pp. 277–288. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1870.0015>
21. *Hugoniot, H.* Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)]. *Journal de l'École Polytechnique*, 1887, N.57, pp. 3–97. (in French).

Отримано 04.03.2024

Received 04.03.2024

Прийнято до друку 11.04.2024

Accepted for publication 11.04.2024

UDC 664.8.047

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HEAT TECHNOLOGY OF
PREBIOTIC COMPLEX-FORMING POWDER PRODUCTIONSniezhkin Yu. F.¹, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Petrov P. I.², postgraduate¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>, email: itf_ntps@ukr.net*²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, <https://orcid.org/0009-0006-0632-3558>, petrov.mriya@gmail.com*<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.3>

The process of dehydration of the prebiotic squash-apple mixture is investigated, taking into account the properties of the material and drying modes. Prebiotic raw materials are maximally represented by dietary fibers, which include pectin substances, the content of which in raw materials is from 6 to 12%. Optimal modes of grinding and separation into different fractions of dry prebiotic materials for obtaining functional powders were determined. The complexing property of prebiotic mixtures is determined, which is 15-20% higher than pure pectin, due to an increase in the open surface of powders and the nativity of pectin substances.

Досліджено процес зневоднення пребіотичної кабачково-яблучної суміші з урахуванням властивостей матеріалу і режимів сушіння. Пребіотична сировина максимально представлена харчовими волокнами, до яких відносяться пектинові речовини, вміст яких в сировині становить від 6 до 12 %. Визначено оптимальні режими подрібнення і розділення на різні фракції сухих пребіотичних матеріалів для отримання функціональних порошків. Визначено комплексуючу властивість пребіотичних сумішей, яка на 15 – 20 % вища, ніж чистого пектину, завдяки збільшенню відкритої поверхні порошків та нативності пектинових речовин.

Bibl. 8, fig. 5, table 1.

Key words: convective drying, grinding, separation, complexing property, prebiotic raw materials, functional products, food powder.

Introduction. One of the common and easy to implement methods to prevent food spoilage, improve safety, facilitate processing and extend shelf life is the drying process [1, 2]. Dehydration not only reduces moisture content and water activity, but also significantly minimizes decay processes caused by the growth of bacteria, yeast and mold.

Dry foods have a wide range of uses, including instant foods, spices added to soups and sauces, muesli and healthy snacks such as fruit and vegetable chips, which have gained popularity recently [3, 4].

Convective drying is the most commonly used process, thanks to several advantages such as a simple dryer and a known drying mechanism [5].

Development of new efficient heat technologies solves the problem of rational use of raw materials, fuel and energy resources [4]. This has not only a scientific, but also a social aspect, because at the same time the scientific foundations of a rational diet are formed and, accordingly, the quality of life is increased [6,7].

The interaction of the elements of the triad "man - technology - nature" is very far from harmony. The forceful influence of the first two components on the third leads to irreversible confrontation: nature responds with destructive spontaneous cataclysms, methodical work on the corrosion of metal parts of technical products, the introduction into the human body (through the respiratory organs and food intake) of substances harmful to it.

The hostilities that take place on the territory of Ukraine lead to pollution of territories, air, soils with heavy metals, which, together with food, enter the human body and lead to various diseases [7].

The creation of preventive and therapeutic products of this direction is based on the concept of introducing food impurities into their formulation that meet the following requirements: safety for the body and effective binding of heavy metals (the formation of strong insoluble complexes with them that are resistant to enzymes in a wide range pH) [8].

To some extent, these requirements are met by food polysaccharides, which are in prebiotic functional powders.

Problem statement is complex and effective processing of plant raw materials into prebiotic combined powders of high biological value. Study of the process of dehydration of the zucchini-apple composition taking into account the properties of the material and drying modes. Determination of optimal modes of grinding dry prebiotic material and dividing it into different fractions to obtain functional powders. Prebiotic powders are characterized by high complexing ability due to the high content of pectin substances.

Determination of radioprotective properties of zucchini-apple powder in comparison with pure pectin preparations.

Purpose of work and setting research objectives. The purpose of the work is effective drying and experimental justification of the dependence of the maximum yield of highly dispersed prebiotic powder on the speed of rotation of the chopper rotor and the separation time to determine the complexing ability of these powders.

Methods of researches. During the research, experimental methods were used using modern means of measuring drying parameters: the time of the experiment, the temperature of the coolant and the reduction of the mass of the material with the help of automated systems for collecting and processing information in the developed programs "Sooshka", and "Cooler" on specially designed and manufactured installations. Methods of mathematical planning of the experiment were used for processing experimental data, and the obtained data were processed in modern integrated systems Excel and Mathcad.

Standard research spectroscopy, electron microscopy methods were used to assess the quality of functional products. Theoretical studies conducted using methods based on the main provisions of the theory of heat and mass transfer, the theory of similarity, which were processed using computer technology.

Presentation of the main material and scientific results. The article presents the results of the influence of the coolant temperature on the drying kinetics of prebiotic raw materials based on zucchini and apple. Two parts of fresh zucchini combined with one part of apple [4].

These products were cut into 5x5 mm cubes, mixed and a certain solution was taken for further experiment. The change in moisture content in the prebiotic raw material, for a certain period of time, to moisture 4-6% does not differ from other types of drying of functional raw materials.

Figure 1 shows the effect of the heat carrier temperature on the drying kinetics (a) and the drying rate (b) of the mixture of zucchini with apple.

As can be seen from the figure, the drying of the mixture takes place during the period of falling rate. At the heat carrier temperature 100 °C, the duration of drying to moisture 4-6% is 2.1 times less, than at the heat carrier temperature 60 °C, and the maximum rate is 1.7 times more.

But, taking into account our previous studies on the effect of temperature on the quality and content of pectin substances in the prebiotic material, which showed that at a temperature of more than 60 °C the gelling property of pectins in the material decreases, therefore drying of samples for the study of grinding, separation and their complexing ability was carried out at a heat carrier temperature of 60 °C [4].

Prebiotic food powders obtained as a result of dispersion consist of a large number of particles and are subject to statistical laws. Experimental studies of these processes have shown, that the distribution of particles by diameter in the aggregate is generally continuous with the presence of extremes. The results of the studies are presented in the form of differential and integral distribution curves, with the argument being the particle size δ , and the function is the content of particles of a given size, expressed by weight.

When constructing differential curves of mass distribution on the abscissa axis, the values of particle diameters are postponed - from the smallest $\delta_{\min}$ to the largest $\delta_{\max}$, and along the ordinate axis - the mass distribution function [4]:

$$F(\delta) = \frac{\Delta m}{Mp \cdot \Delta \delta}, \quad (1)$$

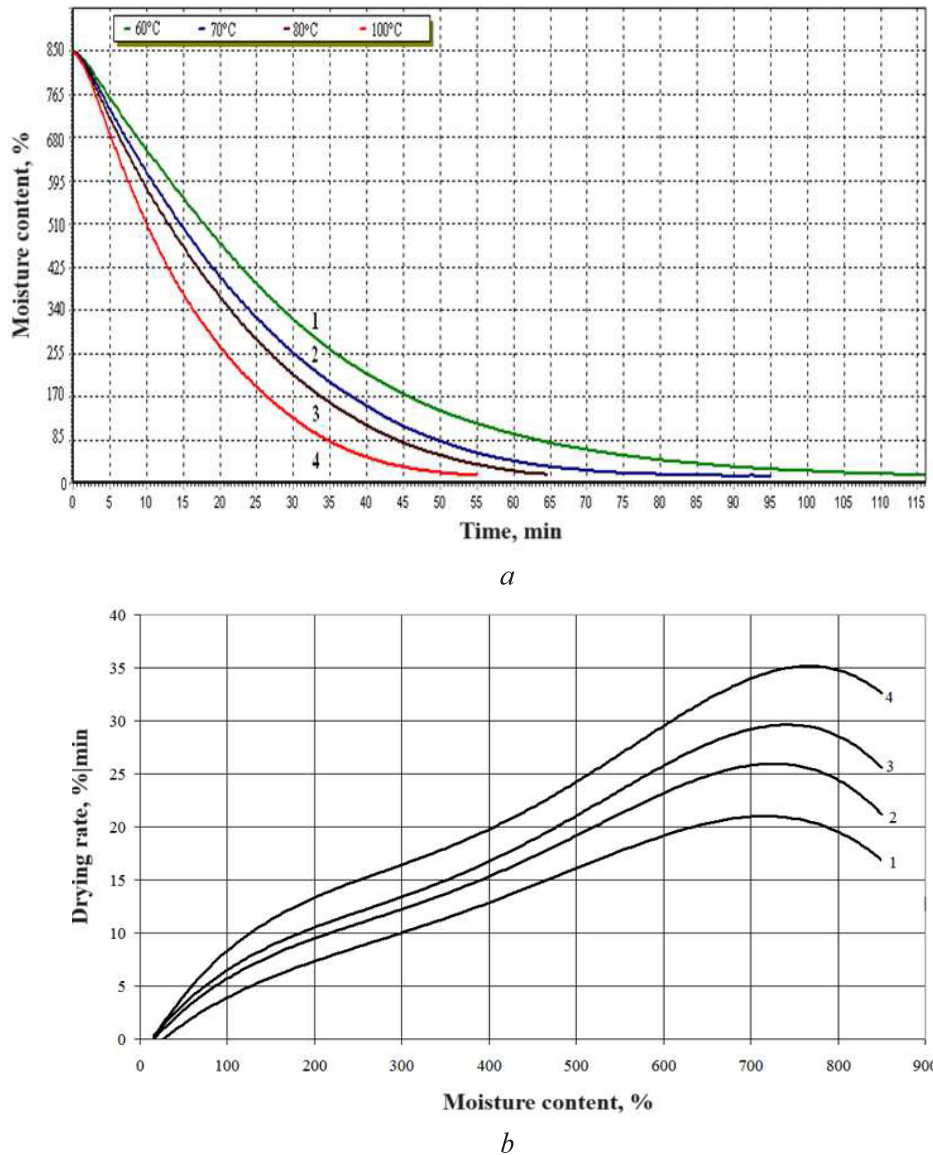
where Mp – total weight of all particles, g;

Δm – mass of particles in the range of sizes from δ to $\Delta \delta$, g.

For further use of the resulting zucchini-apple mixture, samples of the material were ground to a powdery state.

Grinding was carried out on a laboratory disintegrator at a rotor rotation speed of 30-80 m/s. Differential distribution curves of the zucchini-apple powder mixture depending on the rotor speed of the disintegrator showed that they have two maximum values and one minimum (Fig. 2).

The maximum values of the zucchini-apple powder mass distribution are at powder dispersity of 0.16 and 0.4 mm, and the minimum at 0.3 mm. The highest differential distribution of the powder mass from the zucchini-apple



**Fig. 1. Change in moisture content (a) and drying rate (b) of the prebiotic mixture of zucchini with apple (2:1) at different coolant temperatures ($\delta = 10$ mm at $W_{end} = 8$ %; $V = 3,5$ m/s; $d = 10$ g/kg dry air
1 – 60°C, 2 – 70 °C, 3 – 80°C, 4 – 100°C**

mixture is observed with a powder size of 0.16-0.25 mm with a disintegrator rotor rotation speed of 80 m/s. This dimension refers to the finely dispersed. As can be seen from the integral powder weight distribution curves, the amount of powder weight (Fig. 3) at particle size < 0.25 mm is about 70%. Therefore, this fraction and its production modes are recommended for industrial production.

Research on the duration of grinding the zucchini-apple mixture (Fig. 4) showed that increasing the duration of the process from 3 min to 7 min at a rate of 80 m/s increases the output of the highly dispersed fraction by only 1.1%, and at a low speed of 30 m/s min, this difference is 25%.

Therefore, during the industrial production of this powder, it is sufficient to maintain the rotation rate of the disintegrator rotor at 80 m/min and a short duration of about three minutes.

Observations of the overall structure of the zucchini-apple powder using an electron microscope showed that it contains evenly distributed particles of zucchini and apple without agglomeration (Fig. 5). Since the amount of soluble carbohydrates in the mixture decreases, the particles of both apples and zucchini do not stick together (Fig. 5a).

The presented photos in Fig. 5 show how the structure of the combined squash-apple powder (b) differs from apple powder (c) with the same dispersion. Due to the high content

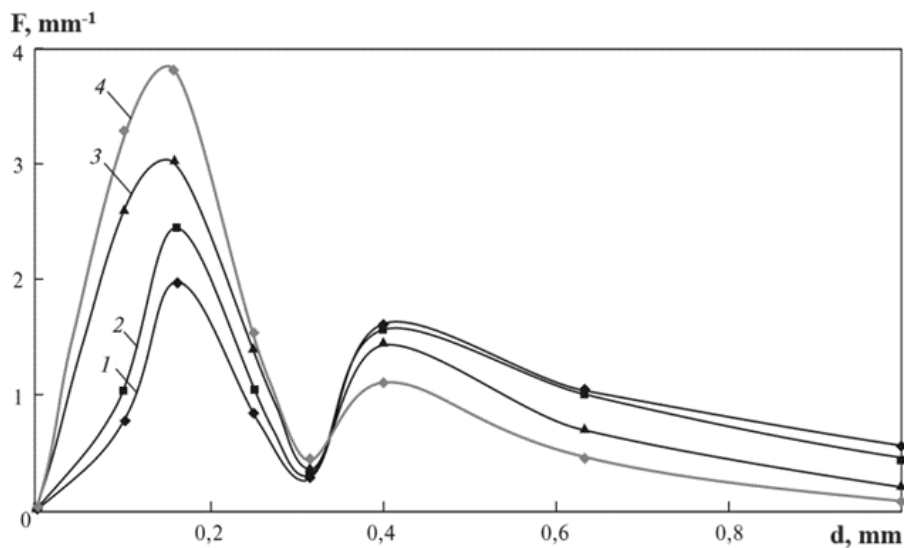


Fig. 2. Differential powder weight distribution curves with squash-apple mixture of particle size at speed rotation of the disintegrator rotors: 1 – 30 m/s, 2 – 50 m/s, 3 – 70 m/s, 4 – 80 m/s and sieving time 5 minutes, ratio of raw material components 2:1

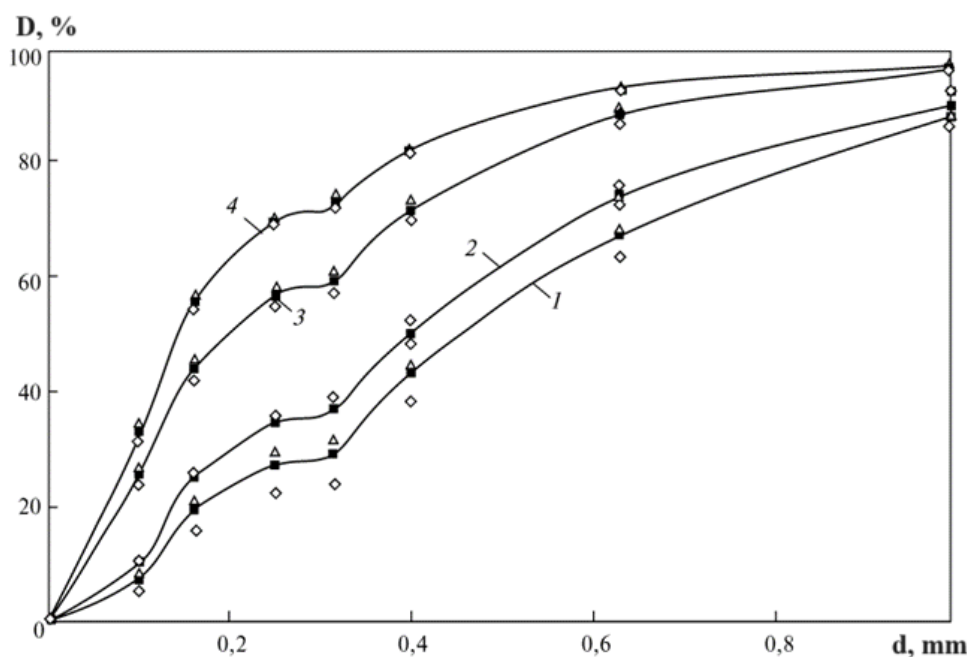


Fig. 3. Integral curves of the distribution of the mass of the zucchini-apple mixture powder from the particle size at the rotational rate of the disintegrator rotors: D, % d, mm

1 – 30 m/s, 2 – 50 m/s, 3 – 70 m/s, 4 – 80 m/s with a sieving time of 5 minutes with a component ratio of 2:1

of soluble carbohydrates, apple powder with a dispersion of 0.16-0.25 mm has the appearance of a continuous agglomerate, which makes it difficult to work with it.

Unlike mono, the combined powder does not contain agglomerates, so it has better structural and mechanical properties.

In food products, it is possible to use functional powders with a fraction of $d=0.5$ mm. Then the yield of powders is about 90% when the rotor rotates at 80 m/s (Fig. 3, 4) for about 3 minutes.

Pectin substances, which are found in the amount of 9-12 % in zucchini-apple powder, are part of dietary fibers

with the property of various positive physiological effects on the body, which refers them to prebiotics.

Prebiotic functional powders after grinding are a complex of dietary fibers, their content is up to 87%.

Thermal treatment of plant raw materials changes the activity of pectins. During the release of moisture in mild conditions, there is a rearrangement of those groups that ensure gelatinization and complexation.

We found in vitro, that 1 % powder solution binds ions of lead, cesium, zirconium. The following functional powders were studied: zucchini-apple, zucchini, apple. The determination of the complexing property was determined by the method given in the work [4].

The experiment is based on the complexing property of pectin. The solution of the metal salt of a given concentration

was contacted with an aqueous suspension of powders. By the difference between the introduced and the left metal, we find the percentage of metal binding.

As noted by other authors, the complexing property is predominantly pectins. Studies of complexing properties of prebiotic powders determined in vitro with different metals.

Pure apple pectin was used for comparison (Table 1). Powders and pectin were < 0.5 mm dispersed. Table 1 shows the complex-forming properties of functional powders with respect to lead, copper, zinc, zirconium, cesium. The analysis of Table 1 shows, that the prebiotic zucchini-apple powder binds heavy metal ions better, than apple pectin in all indicators. The 20 % lead, 9 % zirconium, 5 % cesium, 2 % zinc, 1 % copper. If we compare mono powders, apple powder is better than zucchini powder.

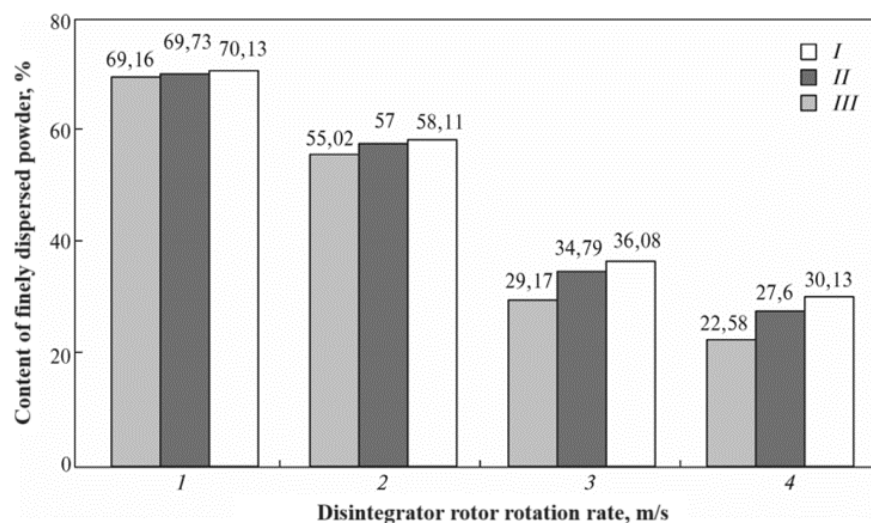


Fig. 4. Dependence of the yield of the highly dispersed fraction < 0.25 mm of pumpkin-apple powder on the speed of rotation of the disintegrator rotor (1 – 80 m/s; 2 – 70 m/s; 3 – 50 m/s; 4 – 30 m/s;) for different sieving times, min: I – 3; II – 5; III – 7 with a ratio of components of 2:1

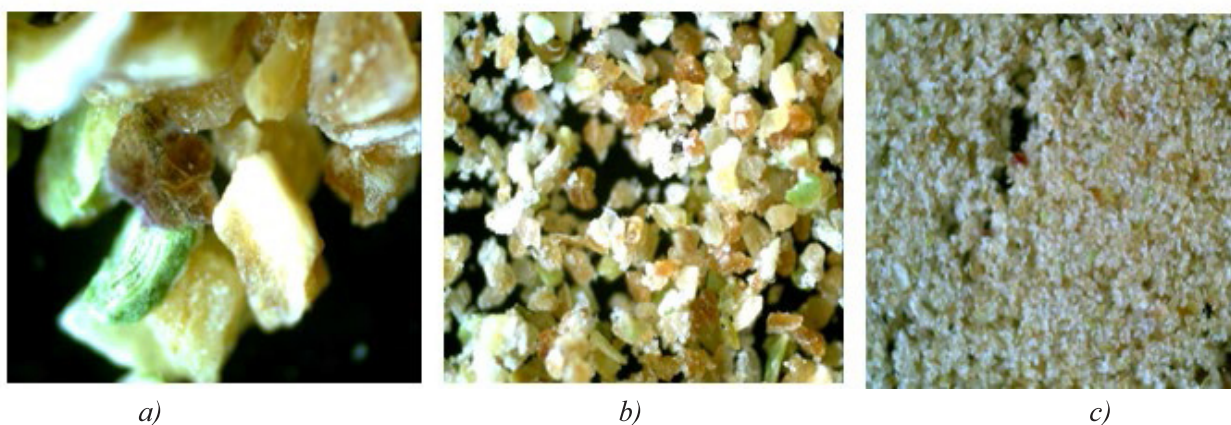


Fig. 5. Photographs of zucchini-apple powder on an electron microscope at a magnification of 400:1, fraction sizes: a) 0,63 – 1 mm; b) 0,16 – 0,25 mm; c) less than 0.1 mm

Table 1. Binding of heavy metal ions by prebiotic powders in vitro (% of the introduced amount of metals)

Metal	pH-binding	Apple pectin	Functional powders		
			Apple	Zucchini	Zucchini-apple
Lead	3,5-5,6	60	72	76	80
Copper	4,0-6,0	55	59	56	56
Zinc	3,5-6,0	67	73	66	69
Zirconium	2,0-3,5	53	67	50	62
Cesium	1,5-3,0	47	48	49	52

As can be seen from the table 1 complexing property of prebiotic zucchini-apple powder is 1-20% higher, than pure pectin. This can be explained by the fact, that prebiotic powders contain native pectin for the following 5 heavy metal ions. This is also due to the high fiber content in these powders.

Prebiotic zucchini-apple powder has a high content of pectins and has a complexing capacity of up to 80 %, and pure pectin 60 %, apple powder 72 %, zucchini 76 %.

Taking into account the fact that the binding of heavy metal ions by zucchini-apple powder reaches 50-80%, it is advisable to recognize their high radioprotective property.

Conclusions

On the basis of research, an energy-efficient mode of drying prebiotic zucchini-apple raw materials was developed.

Effective modes of dispersion and classification of functional powders have been developed, which, in comparison with monopowders, have better technological properties associated with an increase in dispersion and a decrease in agglomeration.

The complex-forming property of the functional researched materials was determined, which is 1-20% higher than that of pure pectin preparations, due to the increase in the open surface of the powders and the nativeness of pectin substances.

As a result of research, the modes of drying, dispersing, classification and separation are recommended for effective thermal technology of processing prebiotic raw materials into food-functional combined pumpkin-apple powder with high complexing properties for binding heavy metal ions.

REFERENCES

1. *Food Standards: Amendments of Standards of Identity of Enriched Grain Products to Require Addition of Folic Acid / FDA / Federal Register*, 1996; 61: 8781 – 8787.
2. *Maftoonazad N., Dehghani M.R., Ramaswamy H.S.* Hybrid microwave-hot air tunnel drying of onion slices: Drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics, *Drying Technology*, 2022; 40: 966–986, <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1841790>
3. *Sniezshkin Yu., Petrova Zh., Bessarab O., Samoilenko K., Grakov D., Petrov P.* Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 2023; Volume 12. Issue 3: 444-457.
4. *Petrova Zh.O., Sniezshkin Yu.F.* Energy-efficient heat technologies for processing functional raw materials: monograph. *Naukova Dumka*, 2018; 187.
5. *Sniezshkin Yu.F.; Petrova Zh.O.; Paziuk V.M.; Vyshnevskiy V.M.; Malaschuk N.V.* Energy-Efficient Chamber Dryer with Thick Alloy Heating Elements. *Energotehnologii i Resursoberezenie*, 2023; 75 (2): 85–95.
6. *Berry Ottaway P* Harmonisation of European Food Legislation.' FT Management Report Series, Pearson Professional Publications, London. 1995.
7. *EUROPEAN COMMISSION.* 'White Paper on Food Safety'. COM (1999), 2000; 719.
8. *Sniezshkin Yu.F., Petrova Zh.O.* Complexing properties of functional powders. *Nuclear and radiation safety*, 2018; 2(78): 59-64. ISSN 2073-6231.

**ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ
ПРЕБІОТИЧНОГО
КОМПЛЕКСОУТВОРЮЮЧОГО ПОРОШКУ**

Снєжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України,
Петров П.І.², аспірант

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул.
Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, ittf_ntps@ukr.
net, <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул.
Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, petrov.mriya@
gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.3>

Сухі продукти харчування мають широкий спектр застосувань. Конвективне сушіння є найбільш часто використовуваним процесом, завдяки декільком перевагам, таким як нескладна сушарка і відомий механізм сушіння. Створення профілактичних та лікувальних сухих продуктів оснований на концепції розробки на їх основі функціональних сумішей. Введення їх в рецептуру харчування дозволить забезпечити організм захистом від негативного впливу навколишнього середовища. Цим вимогам відповідають харчові полісахариди, до складу до яких входять пектинові речовини, що знаходяться в пребіотичних функціональних порошках. В статті представлено дослідження процесу зневоднення розробленої пребіотичної кабачково-яблучної композиції з урахуванням властивостей матеріалу і режимів сушіння; визначено оптимальні режими подрібнення сухого пребіотичного матеріалу і розділення його на різні фракції для отримання функціональних порошків; визначено комплексують властивість пребіотичних сумішей, яка на 15...20 % вища, ніж чистого пектину, завдяки збільшенню відкритої поверхні порошків та нативності пектинових речовин.

Ключові слова: конвективне сушіння, подрібнення, розділення, комплексують властивість, пребіотична сировина, функціональні продукти, харчовий порошок. Бібл. 8, рис. 5, табл. 1.

1. *Standards: Amendments of Standards of Identity of Enriched Grain Products to Require Addition of Folic Acid / FDA / Federal Register*, 1996; 61: 8781 – 8787.

2. Maftoonazad N., Dehghani M.R., Ramaswamy H.S. Hybrid microwave-hot air tunnel drying of onion slices: Drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics, *Drying Technology*, 2022; 40: 966–986, <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1841790>

3. Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Bessarab O., Samoilenko K., Grakov D., Petrov P. Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 2023; Volume 12. Issue 3: 444-457.

4. Петрова Ж.О., Снєжкін Ю.Ф. Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини: монографія. Київ: Наукова думка, 2018. 187 с.

5. Snezhkin Yu.F.; Petrova Zh.O.; Paziuk V.M.; Vyshnevskiy V.M.; Malaschuk N.V. Energy-Efficient Chamber Dryer with Thick Alloy Heating Elements. *Energotehnologii i Resursosberezenie*, 2023; 75 (2): 85–95.

6. Berry Ottaway P Harmonisation of European Food Legislation.' FT Management Report Series, Pearson Professional Publications, London. 1995.

7. EUROPEAN COMMISSION. 'White Paper on Food Safety'. COM (1999), 2000; 719.

8. Снєжкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. Комплексують властивості функціональних порошків. Ядерна та радіаційна безпека, 2018; 2(78): 59-64. ISSN 2073-6231.

Отримано 29.01.2024
Received 29.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 66.061:532.528

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ПРОТОЧНОМУ КАВІТАЦІЙНОМУ ЗМІШУВАЧІ СТАТИЧНОГО ТИПУ

Авдєєва Л.Ю.¹, докт. техн. наук, Макаренко А.А.², канд. техн. наук, Турчина Т.Я.³, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹провідний науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

²науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

³старший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.4>

В статті представлено результати дослідження процесу екстрагування суцвіть календули лікарської в проточному гідродинамічному кавітаційному змішувачі статичного типу. Наведенні графіки залежності вмісту сухих речовин в екстракті від циклу оброблення рослинної суспензії та від внутрішнього діаметру горловини сопла. Представлені дослідження мікроструктури зразків водної суспензії нагідок, оброблених методом гідродинамічної кавітації. За результатами експериментальних і аналітичних досліджень визначено раціональні геометричні параметри конструкції апарату і теплотехнологічні режими проведення процесу екстрагування.

The article presents the results of a study on the extraction process of marigold flower heads in a flow hydrodynamic cavitation static-type mixer. The provided graphs show the dependence of dry matter content in the extract on the processing cycle of the plant suspension and the inner diameter of the nozzle throat. Microstructure studies of water suspensions of marigold heads processed by hydrodynamic cavitation are also presented. Based on the results of experimental and analytical research, rational geometric parameters of the apparatus design and heat technological modes for the extraction process have been determined.

Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: екстрагування, масообмінні процеси, рослинні екстракти, гідродинамічна кавітація, трубка Вентурі, число кавітації.

Постановка проблеми. Рослинні екстракти, які є головним джерелом багатьох біологічно активних речовин (БАР) і сполук, широко використовуються в рецептурах багатьох харчових продуктів, а також фармацевтичних і косметичних засобів. Не зважаючи на те, що екстрагування відноситься до одного з найстаріших способів виділення БАР, проведення цього процесу все ще вимагає багатьох уточнень. Це пов'язано із тим, що рослинна сировина має значні відмінності за морфологічною структурою, своїм складом і фізико-хімічними властивостями. Особливістю дифузійних процесів при отриманні екстрактів з рослинної сировини є наявність жорстких клітинних перегородок, які значно знижують швидкість розчинення БАР і переходу твердої фази в розчинну. Крім того, переважно більшість екстракційних препаратів отримують з висушеної рослинної сировини, отриманої шляхом теплового сушіння. Внаслідок сушіння клітинна стінка набуває властивостей пористої перегородки, через яку можуть дифундувати БАР, молекули яких не перевищують розміру

пор. Всі ці фактори значно ускладнюють проведення ефективних масообмінних процесів, а процес екстрагування набуває складного фізико-хімічного характеру, який пов'язаний з поверхневими явищами через взаємодію молекул екстрагенту з молекулами клітинних структур рослинної сировини. Значна кількість видів рослинної сировини, різноманітність її складу і властивостей вимагає застосування нових і постійного удосконалення існуючих методів екстрагування [1, 2].

Календула лікарська (*Calendula officinalis* L.), широко відома як в офіційній, так і в народній медицині. Для отримання БАР використовується є вся надземна частина рослини в період цвітіння, але найчастіше для одержання екстрактів використовуються суцвіття. До складу БАР суцвіть входять: каротиноїди (каротин, лікопін, віолаксантин, цитраксантин, рубіксантин, флавохром), флавоноїди (нарцисин, рамнетин, ізорамнетин-3-триглюкозид, ізокверцитрин), олія ефірна, сапоніни, календен, смолисті і дубильні речовини, слиз, інулін, кислоти органічні (яблучна, саліцилова, пентадецило-

ва), фітостерин, ферменти, вітамін С, алкалоїди. Екстракти з БАР календули чинять протизапальну, ранозагоювальну, бактерицидну, спазмолітичну і жовчогінну дію, прискорюють процеси регенерації тканин. Великий спектр фармакологічної активності суцвіть календули, обґрунтований наявністю різноманітних класів БАР робить цю сировину цінним ресурсом для виробництва лікарських препаратів та дієтичних добавок[3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Комплексна і ефективна переробка рослинної сировини, що є нагальною виробничою потребою, вимагає використання найбільш ефективних способів обробки з високим ступенем впливу на матеріал і зменшення енерговитрат при виконанні технологічного процесу. Для цього необхідно застосування нових або удосконалення існуючих науково обґрунтованих технологій і обладнання із застосуванням таких режимних параметрів проведення всіх етапів обробки, що враховують специфіку переробки різного роду рослинної сировини [1, 2, 4].

Ефективність екстрагування твердої речовини рідиною залежить від її розчинності та швидкості переходу з однієї фази в іншу. Розчинність можна збільшити за рахунок використання відповідного розчинника, а швидкість переходу речовини з твердої фази в розчин можна змінити впливаючи на швидкість проникнення рідини в тверду фазу, швидкість дифузії речовини в рідини, або швидкість вилучення речовини з поверхні розділу фаз. Прискорити швидкість переходу речовини з твердої фази в розчин можна шляхом збільшення площі поверхні частинок твердої фази за рахунок подрібнення зразка або інтенсивного перемішування маси для здійснення постійної подачі свіжого розчинника на межу розділення фаз для створення високої різниці концентрацій. Швидкість екстрагування також залежить від тиску і температури проведення процесу [2].

Ідеального розчинника для екстракції рослинної сировини поки немає. Екстрагент повинен проникати через стінки клітинних мембран і вибірково розчиняти всередині клітини біологічно активні речовини. При виборі розчинника необхідно враховувати його низьку токсичність, активність при невисоких температурах проведення процесу екстрагування, швидкий масообмін та запобігання повторному структуроутворенню і утворенню дисоціатів. В результаті комбінування різних екстрагентів можна отримати комплексний розчинник для забезпечення вибіркової екстракції певної конкретної речовини або комплексу речовин, хімічний склад або фізіологічну направленість екстракту, його стабільність, стійкість до дії мікрофлори

та інші властивості. В якості екстрагентів цінних речовин та властивостей календули використовується спирт, підготовлена вода, ефіри, олія, діоксид вуглецю або їх поєднання. До переваг використання води в якості екстрагенту відноситься доступність, низька собівартість і наявність гідрофільних біополімерів у структурі рослинної клітини. Водні екстракти характеризуються високою біодоступністю біологічно активних речовин, широким спектром використання, нетоксичністю, відносно низькою собівартістю і комплексною дією. [4].

При виробництві екстракту календули використовуються різноманітні методи для отримання найбільшої кількості корисних БАР і сполук, які потім використовуються в якості інгредієнтів для есенцій, мазей, кремів тощо. Для отримання водних екстрактів лікарських рослин, в т.ч. квіток календули традиційними методами вважаються мацерація або перколяція. Однак такі методи мають значні недоліки, такі як використання великого об'єму розчинника та тривалий час екстракції. Для інтенсифікації масообмінних процесів при екстрагуванні на сьогодні перевага надається обладнанню із інтенсивним впливом на дисперсну систему різноманітних зовнішніх факторів, які дозволяють змінити в потрібному напрямку стан системи і швидкість протікання в ній процесів масопереносу. При виборі обладнання важливим є зменшення енерговитрат, скорочення тривалості найбільш енергоємних технологічних процесів, висока продуктивність, безперервність роботи, отримання заданих характеристик готових екстрактів [5, 6].

Таким чином, основними причинами, що ускладнюють процес екстрагування є особливості рослинної сировини і швидкість масообміну при екстрагуванні. Тому актуальними є раціональний вибір обладнання і дослідження впливу теплофізичних умов процесу екстракції, що можуть бути застосовані як інтенсифікуючі чинники при виділенні біологічно активних речовин з певної рослинної сировини.

Метою роботи є дослідження переходу твердих речовин суцвіть календули лікарської в розчинний стан в кавітаційному змішувачі статичного типу для інтенсифікації масообмінних процесів при отриманні водних екстрактів.

Матеріали та методи. Для дослідження були використані попередньо подрібнені до 0,1-2 мм сухі суцвіття календули лікарської. Екстрагентом було обрано дистильовану воду. Перед кавітаційною обробкою квітки нагідок витримували для набухання в дистильованій воді при температурі 20 ± 2 °C впро-

довж 25 хв. при гідромодулі 1:15. При використанні таких параметрів спостерігалась максимальна різниця концентрацій і виявлено найвищу інтенсивність переходу сухих речовин в початкову суспензію. Після проведеної витримки отриману суспензію обробляли в експериментальному кавітаційному змішувачі.

Для проведення дослідження екстрагування методом кавітації використовувався дослідний кавітаційний реактор типу трубки Вентурі. Експериментальний стенд [7] складався з таких основних частин: пульту управління, змінного кавітаційного реактора, об'ємного шестеренного насоса із запірною арматурою, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком, циліндричної приймальної ємності, з'єднувального трубопроводу та вивідного патрубку для відбору зразків. Кавітаційний реактор представляє собою сопло Вентурі з геометричними розмірами: діаметр вхідного і вихідного каналу 0,042 м, кут розкриття конфузора 90°, кут розкриття дифузора 120°. Горловина сопла - вузький циліндричний канал постійного діаметру в якому втрати енергії зумовлені лише опором в'язкого тертя стінок каналу. Дослідження проводились при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м, 0,008 м, 0,010 м і 0,012 м. Довжина горловини сопла 0,020 м.

Ефективність екстрагування визначали за кількістю водорозчинних речовин (СР), які перейшли в екстракт за ДСТУ 8004:2015 Концентрати харчові. Методи визначення вологоти.

В якості параметра для характеристики явища кавітації в середині даного реактора використовувались значення числа кавітації (χ), що розраховували за формулою (1):

$$\chi = \frac{p - p_{\text{кав}}}{1/2 \rho \cdot v^2}, \quad (1)$$

де p – тиск перед соплом, Па;

v – швидкість течії в горловині сопла, м/с;

$p_{\text{кав}}$ – тиск насиченої пари, при якому виникає кавітація, Па;

ρ – густина рідини, кг/м³.

Дослідження мікроструктури суспензій проводили мікроскопічним методом за допомогою мікроскопа «МБІ ЗУ 4.2» з одночасною мікрофотозйомкою окремих зразків за допомогою цифрового фотоапарату при збільшенні 280х. Для досліджень готувались в середньому по 6-10 проб кожного зразку.

Викладення основних результатів досліджень.

Вибір методу екстрагування, співвідношення компонентів, теплотехнологічних режимних параметрів проведення виробництва екстрактів залежать від конкретного виду рослинної сировини. Перспективними для застосування при екстрагуванні є апарати, дія яких заснована на використанні явища гідродинамічної кавітації. Серед значної кількості їх модифікацій, цікавість викликають проточні статичні кавітаційні апарати. Кавітаційні апарати статичного типу мають один або декілька спеціальних нерухомих елементів у вигляді сопел, діафрагм, перегородок, або дисків, що перешкоджають руху потоку. В результаті відбувається різка зміна напрямку руху потоку рідини із різкою зміною тиску нижче за деяке критичне значення (поріг кавітації) із розривами суцільності рідини і утворенням кавітаційних бульбашок. Викид кумулятивного мікроструменя, який виникає в результаті зхлопування бульбашок, призводить до порушення рівноваги системи і супроводжується виникненням аномально високих локальних тисків, температур і потенціалів, що керують інтенсивністю перенесення маси, імпульсу і енергії через міжфазну поверхню. Висока ефективність обробки складних дисперсних систем в проточних кавітаційних апаратах здійснюється за рахунок імпульсного багатofакторного впливу: вихроутворення, мікомасштабних пульсацій тиску, інтенсивної кавітації, ударних хвиль і нелінійних гідроакустичних ефектів [8]. Дуже часто статичні кавітаційні апарати виготовляють на основі трубки Вентурі (NRHCR). Ці апарати відрізняються значною ефективністю багатofакторного впливу на матеріал, а також характеризуються простотою і надійністю конструкції. Їх використання дозволяє посилити інтенсивність впливу при обробці складних дисперсних систем і покращити фізичні, хімічні та біологічні характеристики отриманих продуктів, збільшити загальну кількість розчинних речовин і стабільність екстрактів. Коротка тривалість обробки рослинного матеріалу в кавітаційному змішувачі дозволяє зменшити негативний вплив механічної і термічної обробки і зберегти більшу кількість поживних біологічно активних речовин, порівняно до традиційної пастеризації [9, 10].

Загальна конструкція апарату, геометричні параметри виконання сопла, параметри руху течії (абсолютний тиск і швидкість), а також властивості рослинного матеріалу і утвореної суспензії значно впливають на гідродинамічні умови і розвиток кавітаційних ефектів при проведенні обробки.

В дослідженнях використовувались сопла Вентурі з горловинами від 0,006 м до 0,12 м. Дослідні проби відбирались через: 3 цикли (12 с), 9 циклів (36 с), 15 циклів (60 с), 30 циклів (120 с). Ефективність екстрагування визначали за кількістю сухих речовин (СР) в екстракті.

Дослідження показали високу ефективність масопереносу при обробці рослинної суспензії в експериментальному кавітаційному змішувачі. Результати досліджень, наведених раніше показали, що збільшення тривалості кавітаційного впливу призводить до поступового збільшення вмісту сухих речовин в усіх зразках [11]. Найбільшою інтенсивністю змін характеризуються процеси, які відбуваються під впливом кавітаційної обробки впродовж першої хвилини обробки (15 циклів). Вміст сухих речовин в екстрактах, отриманих в результаті 15 циклів обробки зразка суспензії квіток нагідок лікарських при різних діаметрах горловини сопла наведений на рис. 1.

Результати досліджень (рис.1) показали, що збільшення діаметру горловини сопла призводить до зменшення інтенсивності масопереносу, що призводить до зменшення приросту кількості СР в екстракті. Процес екстрагування при діаметрі горловини сопла 6 мм відбувався найбільш ефективно, але при цьому, через високу дисперсність частинок після 15 циклів обробки отриманого зразка, значно ускладнюється процес його фільтрування. Найменші значення кількості СР спостерігались у зразка, отриманого в результаті обробки в соплі з горловиною 0,12 м, кількість СР в якому зменшувалась на 20%. Отримані експериментальні результати підтверджуються і розрахунком числа кавітації. Цей кавітаційний змішувач характеризується найбільшим числом кавітації - 1,36. Таким чином, для екстрагування БАР з суцвіть календули доцільним є використання реактора з горловиною сопла 0,08 м і 0,10 м.

Інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів залежить від швидкості руху потоку – при зростанні швидкості збільшується розрідження потоку і збільшується різниця тисків при проходженні потоку через сопло, тому явище кавітації характерно для великих швидкостей. Для напірних потоків в трубах швидкість потоку впливає на характер руху рідини, що визначається числом Рейнольдса (Re). Цей показник описує вплив сил інерції і сил внутрішнього тертя і дозволяє поєднати фактори руху рідини: основні характеристики потоку (діаметр труби, середня швидкість) і характеристики самої рідини (густина, в'язкість). Критерій Re використовується для дослідження, розрахунків і моделювання течії рідини [7]. Опосередковано про наявність кавітації в потоці при проходженні через дослідне сопло свідчать високі значення числа Re . Так, в дослідному стенді при течії рідини в трубі з діаметром $d = 0,042$ м без використання сопла Вентурі число Рейнольдса має значення $Re = 288036$, що відповідає турбулентному режиму, але не призводить до виникнення кавітації. Залежність числа кавітації від числа Рейнольдса при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м, 0,008 м, 0,010 м і 0,012 м наведена на рис. 2.

Аналіз результатів показав, що отримана залежність носить нелінійний характер (рис. 2). Як видно з рисунка, збільшення числа Re призводить до поступового зменшення χ . За даними літератури, встановлення кавітаційного режиму і найбільша інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів спостерігається при $\chi < 1$. Оброблення водної суспензії суцвіть календули в даному конкретному експериментальному змішувачі висока інтенсивність кавітаційних ефектів спостерігається при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м ($\chi = 0,18$), 0,008 м ($\chi = 0,53$), 0,010 м ($\chi = 0,84$). Подальше збільшення діаметру горловини до 0,012 м в дослідному профілі кавітаційного реактора призводить до зниження інтенсивності кавітаційного впливу

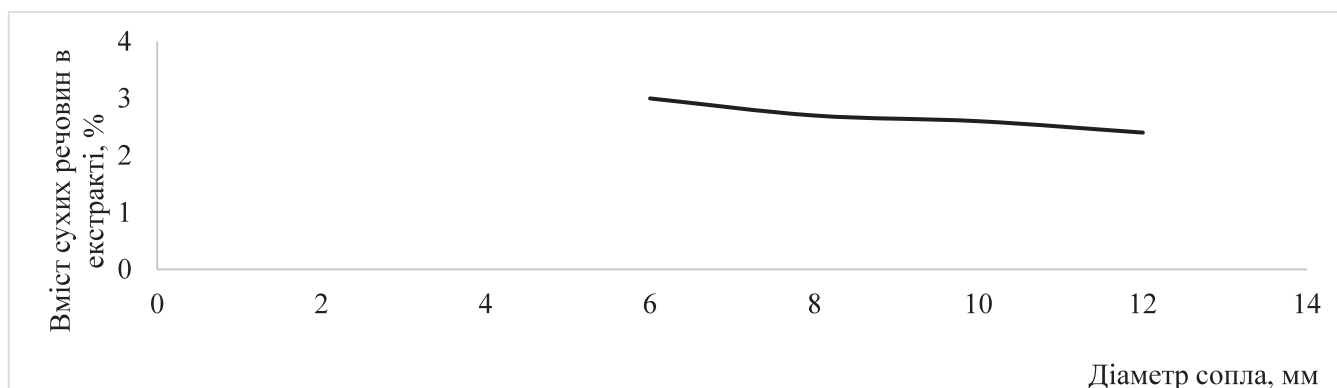


Рис. 1. Залежність вмісту сухих речовин від діаметру горловини сопла

на суспензію з суцвіть календули, що можна пояснити зменшенням швидкості потоку в експериментальному стенді з використанням об'ємного шестеренного насоса при однакових витратах рідини.

Крім того, позитивним є ефект підвищення температури матеріалу, що виникає в результаті виникнення інтенсивної гідродинамічної кавітації. За даними літератури це дозволяє провести інактивацію мікроорганізмів і видалення небажаних термостабільних ферментів в екстракті без використання нагрівальних пристроїв, що призводить до покращення якості і збільшення терміну зберігання продуктів і препаратів [12, 13].

Залежність вмісту сухих речовин при екстрагуванні в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини сопла $d = 0,008$ м в результаті 60 циклів обробки наведені на рис.3. Дослідні проби відбирались через 3 цикли (12 с), 9 циклів (36 с), 15 циклів (60 с), 30 циклів (120 с) та 60 циклів (240 с).

Дослідження показали високу ефективність кавітаційної обробки на процеси масопереносу при екстрагуванні водної суспензії суцвіть нагідок

лікарських. Отримані результати свідчать (рис.3), що збільшення тривалості екстрагування в кавітаційному змішувачі призводить до збільшення вмісту сухих речовин. Найбільшою інтенсивністю характеризуються масообмінні процеси, які відбуваються під впливом кавітаційної обробки впродовж 1 хв. (15 циклів). При подальшій обробці інтенсивність масообмінних процесів дещо знижується.

Аналізуючи отримані результати і узагальнюючи попередні висновки було зроблено висновок про доцільність екстрагування суцвіть календули в експериментальному кавітаційному змішувачі з діаметром горловини сопла 8 мм і 10 мм впродовж 1 хв. (15 циклів).

Дослідження мікроструктури дослідних зразків є важливим етапом вивчення зміни їх структурно-механічних властивостей, які дозволяють візуально охарактеризувати особливості впливу використаних кавітаційних умов обробки зразків.

Під час проведення досліджень вивчались зміни мікроструктури і морфологічних особливостей дисперсних частинок фракцій зразків суспензій суцвіть календули з гідромодулем 1:15, отриманих за різної тривалості

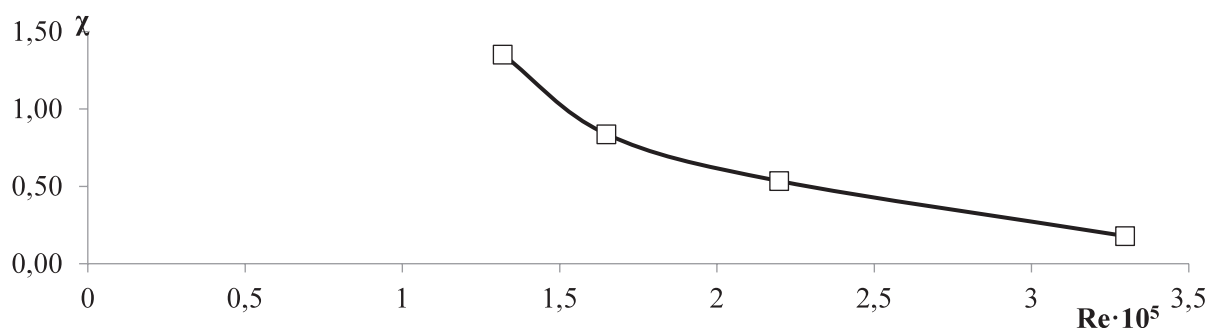


Рис. 2. Залежність числа кавітації від числа Рейнольдса

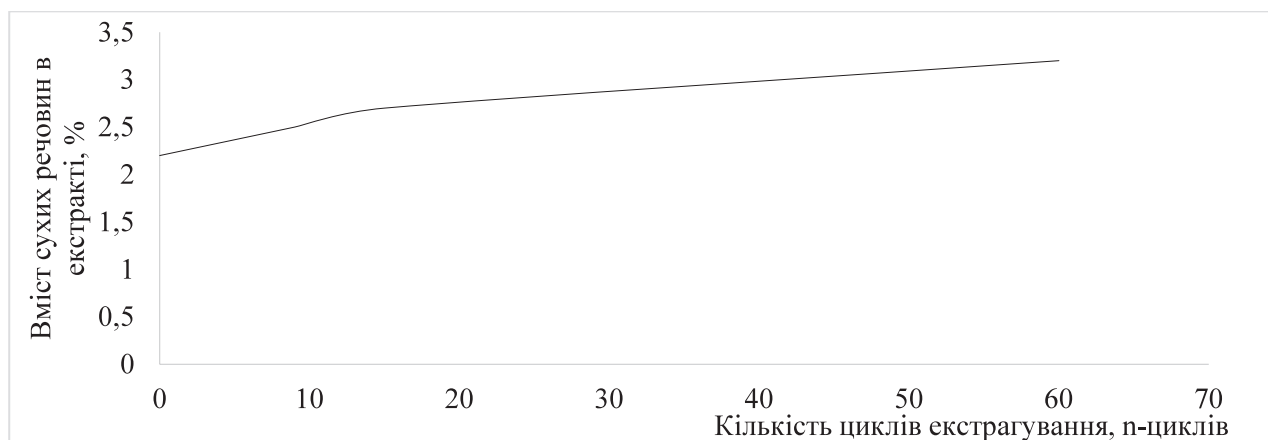


Рис. 3. Залежність вмісту сухих речовин в екстракті від циклу оброблення рослинної суспензії

впливу гідродинамічної кавітації в кавітаційному змішувачі типу трубки Вентурі з діаметром горлови-ни сопла 8 мм. Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа з використанням комп'ютерних програм аналізу зображень. Отримані зображення мікроструктури представлено рис. 4

Дослідження дозволили візуально підтвердити, що гідродинамічна кавітація характеризується потужним гідродинамічним впливом на частинки дисперсної фази рослинної сировини на мікрорівні. В результаті чого відбуваються значні зміни властивостей рослинної сировини, а БАР переходять в екстракт. Отримані резуль-

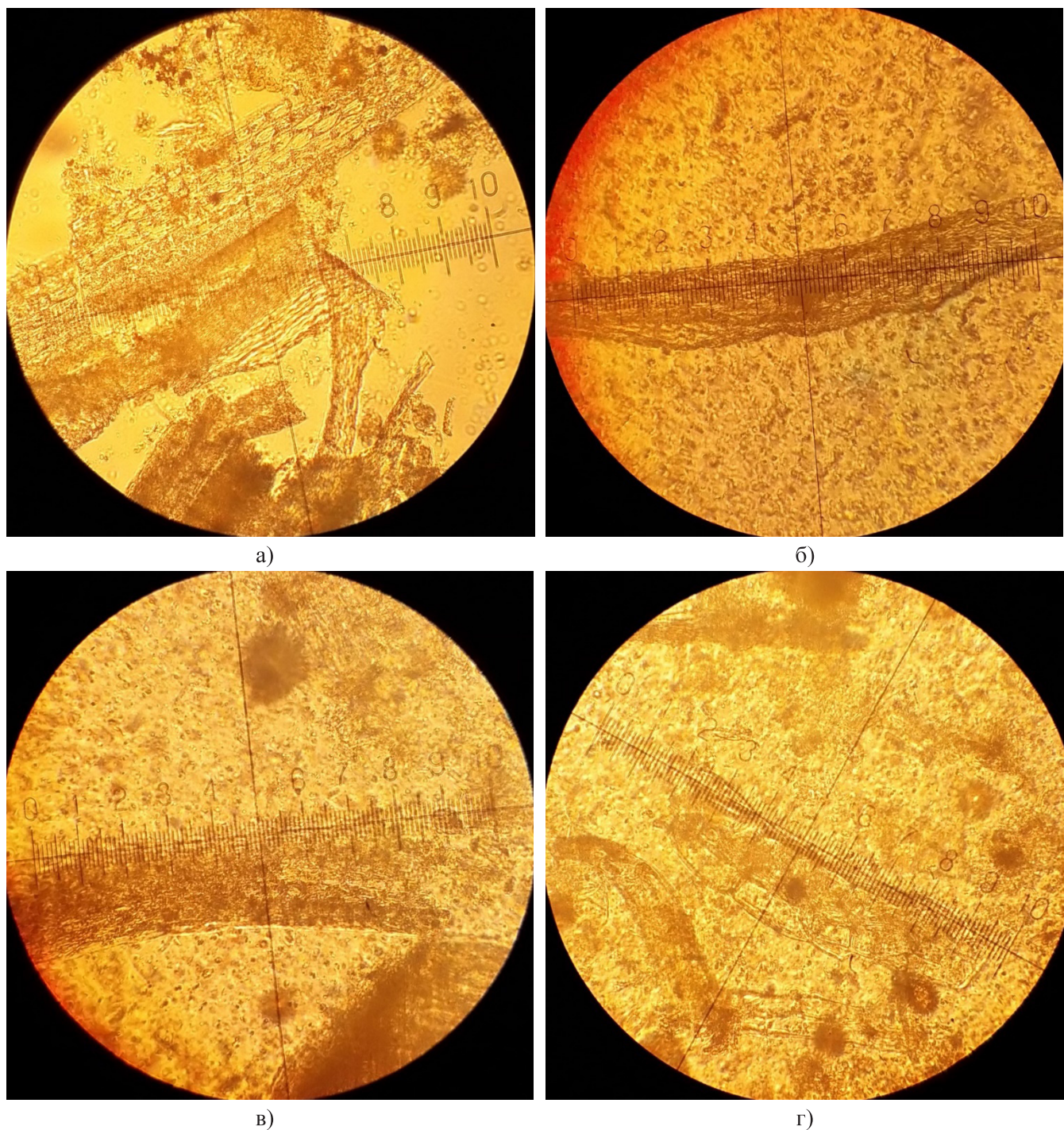


Рис. 4. Мікроструктура зразків водної суспензії нагідок, оброблених методом гідродинамічної кавітації. Збільшення 7x40 (або 280x): а) 3 цикли (12 с); б) 9 циклів (36 с); в) 15 циклів (60 с); г) 60 циклів (4 хв.)

тати показали, що запропонована обробка призводить до поступового руйнування морфологічної структури рослинних клітин сировини. Аналіз результатів досліджень мікроструктури зразка (рис. 4 а) на початковому етапі кавітаційної обробки (впродовж 3 циклів обробки) показав значну неоднорідність розмірів структурних елементів зразка по всьому об'єму, наявність упорядкованих і неупорядкованих рослинних клітин сферичної, еліптичної і, здебільшого, циліндричної форми розміром 25-200 мкм. Зразок характеризується наявністю великих включень упорядкованих повздовжніх рослинних клітин (не менше 90%), на зображенні чітко видно клітинні оболонки. Упорядковані рослинні клітини мають щільну волокноподібну перегородку утворену міцелярними нитками целюлози. Така структура пояснює складність і значні витрати енергії на диспергування сировини. Подальша обробка (рис. 4 б, в, г) призводить до поступового диспергування, розділення окремих клітинних ділянок і зменшення розміру окремих частинок. Дослідження зразка, отриманого після 15 циклів обробки зразка (рис. 4, в) показали значне руйнування рослинних клітин в полі зору. Спостерігається розмивання клітинних оболонок і накопичення значної кількості частинок нерозчинних фракцій розміром 4-20 мкм (до 80%), які знаходяться поза зоною рослинних клітин. Це дозволяє ефективно провести процес екстрагування і значно збільшити кількість БАР в екстракті. Наявністю найдрібніших частинок характеризується зразок (рис. 4, г), отриманий в результаті 60 циклів кавітаційної обробки (4 хв.), де кількість таких частинок зросла до 85-90%.

Таким чином, під дією інтенсивного впливу гідродинамічної кавітації відбуваються незворотні морфологічні зміни структурних систем рослинного матеріалу. В результаті відповідно змінюються і структурно-механічні і фізико-хімічні властивості одержаних суспензій. Проведені дослідження довели, що кавітаційна обробка зразків призводить до суттєвого зменшення дисперсності частинок і збільшення площі контакту твердої фази (рослинної сировини) і рідкої фази (екстрагенту). Внаслідок підвищується ефективність масообмінних процесів при екстрагуванні, покращуються умови екстрагування і збільшується кількість водорозчинних речовин в екстракті.

Висновки

Дослідний статичний кавітаційний змішувач типу сопла Вентурі показав себе як високоефективне обладнання в технологіях отримання екстрактів з рослинної сировини.

Використання апаратів такого типу дозволяє значно збільшити ефективність масообмінних процесів при екстрагуванні за рахунок диспергування частинок твердої фази рослинного зразка, поступового збільшення поверхні контакту між фазами при подрібненні і інтенсивного перемішування маси суспензії для створення високої різниці концентрацій. Таким чином, досягається значне зменшення тривалості проведення процесу.

Раціональний вибір геометричних параметрів конструкції апарату і теплотехнологічних режимів проведення процесів дозволяє отримати екстракти заданого хімічного складу із високим вмістом БАР.

Отримані висновки підтверджуються дослідженнями мікроструктури.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Hamuel J.* Phytochemicals: Extraction Methods, Basic Structures and Mode of Action as Potential Chemotherapeutic Agents [Internet]. Phytochemicals - A Global Perspective of Their Role in Nutrition and Health. InTech; 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/26052>
2. *Azwanida, N.N.* A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. Medicinal and Aromatic Plants, 2015. 4, 196. doi:10.4172/2167-0412.1000196
3. *Rojas Bedoya LC, Gómez López K, Marín Pareja N.* Extraction of metabolites from *Calendula officinalis* and evaluation of their colorant and antibacterial capacity. Rev. colomb. biotechnol. [Internet]. Jan 1, 2020 ; 22(1):60-9. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79999>
4. *Abubakar AR, Haque M.* Preparation of Medicinal Plants: Basic Extraction and Fractionation Procedures for Experimental Purposes. J Pharm Bioallied Sci. 2020;12(1):1-10. doi:10.4103/jpbs.JPBS_175_19
5. *Ak, G. Zengin, G. Sinan, K.I. Mahomoodally, M.F. Picot-Allain, M.C.N. Cakir, O. Bensari, S. Yilmaz, M.A.; Gallo, M. Montesano, D.* A Comparative Bio-Evaluation and Chemical Profiles of *Calendula officinalis* L. Extracts Prepared via Different Extraction Techniques. Appl. Sci. 2020, 10, 5920. <https://doi.org/10.3390/app10175920>
6. *Ourabia, Imane & Djebbar, Réda, Samira, Tata, Sabaou, Nasserline, Fouial-Djebbar, Djamilia.* Determination of essential oil composition, phenolic content, and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of marigold (*calendula officinalis* l.) cultivated in algeria. Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019. 11. 93-110. 10.34302/crpfst/2019.11.2.8.

7. Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.
8. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамики и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках (под ред. А.А. Долинского). – Киев, Наукова думка, 2001. – 348 с.
9. Avdieieva L., Makarenko A., Turchyna T., Dekusha H., Kozak M. Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. Food science and technology. 2023. Vol. 17, Issue 1. P. 38-50 <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559>
10. Terán Hilares R, Dos Santos JG, Shiguematsu NB, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC. Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. Ultrason Sonochem. 2019;54:192-197. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.01.039
11. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Ефективність використання сопел типу Вентурі при отриманні водних рослинних екстрактів. Scientific Works of NUFT 2022. Volume 28, Issue 6. С. 64 -72 DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-6-8
12. Xun Sun, Chan Hyeok Kang, Jong Jin Park, Hyun Soo Kim, Ae Son Om, Joon Yong Yoon, An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor, Experimental Thermal and Fluid Science, V. 99, 2018, P. 200-210, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>.
13. Milly PJ, Toledo RT, Harrison MA, Armstead D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods [published correction appears in J Food Sci. 2008 Mar;73(2):vii]. J Food Sci. 2007;72(9):M414-M422. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x

STUDY OF THE PROCESS OF PLANT RAW MATERIAL EXTRACTION IN A STATIC-TYPE CAVITATION INLINE MIXER

Avdieieva L.Yu.¹, Makarenko A.A.², Turchyna T. Ya.³

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

¹Dr. Sci. (Engin Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>)

²PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

³PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.4>

Abstract. The flowering heads of calendula have a significant content of biologically active substances (BAS) with a wide range of pharmacological activities. Traditional methods for obtaining their aqueous extracts include maceration or percolation. However, these methods have significant drawbacks. The rational choice of equipment and the study of the influence of thermophysical conditions on the extraction process of specific plant raw materials to intensify mass transfer processes are relevant.

The aim of the study is to investigate the transition of solid substances of calendula flowers into a soluble state in a flow cavitation mixer of a static type to intensify mass transfer processes in obtaining aqueous extracts.

For the research, previously ground dry calendula flower heads, swollen in distilled water at a hydro module of 1:15 and reduced to 0,1-2 mm, were used. The work was carried out on an experimental cavitation mixer of the Venturi tube type with a variable cavitation reactor with a nozzle throat diameter ranging from 0,006 m to 0,12 m. The efficiency of extraction was determined by the amount of water-soluble substances, and the cavitation phenomenon was characterized by the cavitation number.

Results: The overall design of the cavitation apparatus, the profile and geometric parameters of the nozzle, the flow parameters, as well as the properties of the plant material, significantly affect the hydrodynamic conditions and the development of cavitation effects during processing. The Venturi-type flow cavitation mixer used in the research showed high efficiency in processing mass transfer processes during the extraction of a water suspension of calendula

flower heads. The results obtained indicate that the most significant impact of cavitation effects is observed at nozzle throat diameters of 0,08 m and 0,10 m, with cavitation numbers $\chi = 0,53$ and $\chi = 0,84$, respectively. In this case, the process duration can be limited to 60 seconds. The obtained conclusions are confirmed by microstructure studies.

References 13, figures 4.

Key words: extraction, mass transfer processes, plant extracts, hydrodynamic cavitation, Venturi tube, cavitation number.

1. *Hamuel J.* Phytochemicals: Extraction Methods, Basic Structures and Mode of Action as Potential Chemotherapeutic Agents [Internet]. Phytochemicals-A Global Perspective of Their Role in Nutrition and Health. InTech; 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/26052>

2. *Azwanida, N.N.* A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. Medicinal and Aromatic Plants, 2015. 4, 196. doi:10.4172/2167-0412.1000196

3. *Rojas Bedoya LC, Gómez López K, Marín Pareja N.* Extraction of metabolites from Calendula officinalis and evaluation of their colorant and antibacterial capacity. Rev. colomb. biotechnol. [Internet]. Jan 1, 2020 ; 22(1):60-9. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79999>

4. *Abubakar AR, Haque M.* Preparation of Medicinal Plants: Basic Extraction and Fractionation Procedures for Experimental Purposes. J Pharm Bioallied Sci. 2020;12(1):1-10. doi:10.4103/jpbs.JPBS_175_19

5. *Ak, G. Zengin, G. Sinan, K.I. Mahomoodally, M.F. Picot-Allain, M.C.N. Cakir, O. Bensari, S. Yilmaz, M.A.; Gallo, M. Montesano, D.* A Comparative Bio-Evaluation and Chemical Profiles of Calendula officinalis L. Extracts Prepared via Different Extraction Techniques. Appl. Sci. 2020, 10, 5920. <https://doi.org/10.3390/app10175920>

6. *Ourabia, Imane & Djebbar, Réda, Samira, Tata, Sabaou, Nasserddine, Fouial-Djebbar, Djamila.* Determination of essential oil composition, phenolic content, and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of marigold (calendula officinalis L.) cultivated in algeria. Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019. 11. 93-110. 10.34302/crpfjst/2019.11.2.8.

7. *Dolinskiy A.A., Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A.* Kavitatsiyni tekhnolohiyi dlya vyrobnytstva nanopreparativ.[Cavitation Technologies for the Production of Nanopreparations] Kyiv: Nauk. Dumka. 2020. 112 p. (in Ukr.)

8. *Nakorchevsky A.I., Basok B.I.* Hydrodynamiky i teplomassoperenos v heterohennykh systemakh i pulsiruyushchikh potokakh [Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer in Heterogeneous Systems and Pulsating Flows] (pod red. A.A. Dolinskoho). Kyiv, Naukova dumka, 2001. 348 p. (in Rus.)
9. *Avdieieva L., Makarenko A., Turchyna T., Dekusha H., Kozak M.* Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. Food science and technology. 2023. Vol. 17, Issue 1. P. 38-50 <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559>
10. *Terán Hilares R, Dos Santos JG, Shiguematsu NB, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC.* Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. Ultrason Sonochem. 2019;54:192-197. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.01.039
11. *Avdieieva L. Yu., Makarenko A. A.* Efektyvnist vykorystannya sopel typu Venturi pry otrymanni vodnykh roslynnykh ekstraktiv [The efficiency of using Venturi-type nozzles in obtaining aqueous plant extracts]. Scientific Works of NUFT 2022. Volume 28, Issue 6. P. 64-72 DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-6-8
12. *Xun Sun, Chan Hyeok Kang, Jong Jin Park, Hyun Soo Kim, Ae Son Om, Joon Yong Yoon,* An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor, Experimental Thermal and Fluid Science, V. 99, 2018, P. 200-210, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>.
13. *Milly PJ, Toledo RT, Harrison MA, Armstead D.* Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods [published correction appears in J Food Sci. 2008 Mar;73(2):vii]. J Food Sci. 2007;72(9):M414-M422. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x

Отримано 19.09.2023

Received 19.09.2023

Прийнято до друку 11.04.2024

Accepted for publication 11.04.2024

УДК 664.8.047

ТЕОРЕТИЧНИЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІНЕТИКИ СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ

Давиденко Б.В.¹, докт. техн. наук, Самойленко К.М.², канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: katernasamoilenkoittf@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5169-4466><https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.5>

В статті наведено теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Для визначення характеристик процесу конвективного сушіння, крім експериментальних досліджень, виконано чисельне моделювання даного процесу, яке виконується на основі розв'язання системи рівнянь тепломасопереносу в колоїдних капілярно - пористих матеріалах. Розрахункова модель може застосовуватись для наближеного визначення основних характеристик процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

The article provides a theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of colloidal capillary-porous materials. To determine the characteristics of the convective drying process, in addition to experimental studies, numerical modeling of this process was performed, which is performed on the basis of the numerical solution of the system of heat and mass transfer equations in colloidal capillary-porous materials. The calculation model can be used for the approximate determination of the main characteristics of the drying process of colloidal capillary-porous materials.

Бібл. 10, рис. 11.

Ключові слова: тепломасоперенос, сушіння, колоїдні капілярно-пористі матеріали, культивовані гриби *Pleurotus eryngii*.

Постановка проблеми. Сушіння рослинної сировини (колоїдних капілярно-пористих матеріалів) з метою переробки на сухі продукти відноситься до енергоємних процесів. На процеси сушіння витрачається в світі близько 10-12 % всієї енергії.

Враховуючи нині ситуацію в енергетичному секторі України, нагальна потреба в удосконаленні та розробці енергоефективних теплотехнологій зневоднення рослинної сировини є актуальною та на часі, які б забезпечували мінімальні витрати енергії та високу якість кінцевого продукту.

Виробництво та переробка рослинної сировини належить до стратегічно важливих напрямків розвитку сільськогосподарського виробництва, що не лише гарантує продовольчу безпеку держави, але також забезпечує сировиною харчову та переробну промисловість. Наразі популярності набирають сушені харчові продукти (натуральні харчові порошки, або у вигляді стружки, шматочків, чипси і т.д.), які можуть використовуватись як і в виробничих масштабах при виробництві продуктів швидкого приготування, так і в роздрібній доступності із метою полегшення

приготування їжі та заміни синтетичних приправ, які є дуже шкідливими.

В грибній індустрії на світовому харчовому ринку все більш актуальними є культивовані гриби *Pleurotus eryngii*, які в найбільших масштабах вирощуються в Європі, Близькому Сході, Китаї та цінуються високим вмістом білку, вуглеводів, ненасиченими жирними кислотами, вітамінами та іншими поживними речовинами. Вони також мають низький вміст жиру з високою харчовою та лікувальною цінністю, що призводить до його високої цінності. Також багаті полісахаридами і мають хороші терапевтичні ефекти, такі як їх активність проти вірусів і гіпоглікемії та здатність знижувати рівень холестерину, сприяти кишковому травленню, запобігати серцево-судинним захворюванням і підвищувати імунітет [1]. Полісахариди грибів мають різноманітну біологічну активність, включаючи антиоксидантну, антигіперліпідемічну, протипухлинну, імунорегуляторну та бактеріостатичну [2].

Одним із способів переробки харчових продуктів є сушіння, що є, порівняно із іншими способами, найдешевшим та широко застосовується для продовжен-

ня терміну придатності в тому числі і культивованих грибів, які мають короткотривалий термін зберігання у свіжому вигляді.

Важливою умовою при розробці таких технологій отримання сухих харчових продуктів є зберегти біологічно активні речовини на високому рівні та максимально можливо знизити енерговитрати на процес переробки. При цьому вирішальну роль відіграє механізація, автоматизація та інтенсифікація виробничих процесів.

Сушіння є складним процесом, який передбачає безперервний тепло- та масообмін, він може супроводжуватися значними змінами якісних показників, хімічного складу, структурних властивостей продукту тощо. Основними характеристиками є збереження кольору, усадка матеріалу та здатність до відновлювання.

Важливо, з метою оптимізації витрат енергії при зневодненні та підбору раціонального обладнання, окрім експериментальних досліджень, виконувати теоретичний розрахунковий аналіз тепломасообміну на основі математичних моделей.

Аналіз досліджень і публікацій. Як видно з літературних джерел [3, 4, 5], задля збереження та продовження терміну зберігання культивованих грибів *Pleurotus eryngii* іноземні науковці постійно досліджують кінетику конвективного сушіння при різних температурних параметрах 40, 50, 60, 70 і 80 °C та різної товщини досліджуваних зразків 4, 8 і 12 мм із постійною швидкістю повітря 2 м/с; метод індивідуальної швидкої заморозки, що використовується для виробництва високоякісних заморожених продуктів шляхом заморожування окремого шматка продукту окремо від інших продуктів; дослідження різних методів зневоднення – природне, сублімаційне, вакуумне, інфрачервоне, мікрохвильове. У кожного із цих методів є відповідні недоліки. Із якісних характеристик це – колір, коефіцієнт усадки, коефіцієнт регідратації, міцність, хрусткість, мікроструктура, поживні компоненти та вільні амінокислоти тощо.

Аналіз літературних даних щодо існуючого математичного моделювання колоїдних капілярно – пористих матеріалів, а саме культивованих грибів *Pleurotus eryngii* показав, що даний напрям має обмежену кількість інформації і тому потребує поглибленого вивчення та є актуальним напрямком досліджень.

Мета роботи. Провести теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів з метою інтенсифікації процесу зневоднення, а саме визначення енергоефективних режимних параметрів.

Матеріали та методи досліджень. Для експериментальних досліджень свіжі культивовані гриби *Pleurotus eryngii*, сортовані за формою, зрілістю і розміром були придбані в мережі супермаркетів у м. Київ від торгової марки «Esthetic foods». Усі зразки грибів доставили в лабораторію та зберігали при температурі $4 \pm 0,5$ °C і відносній вологості 95 % у холодильнику перед експериментом. Початкова вологість становила $88 \% \pm 1,4$ %. Усі зразки, використані для сушіння, були придбані з однієї партії.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Визначальними процесами при сушінні є тепломасоперенос, як вказано вище. Від його інтенсивності залежить не лише ефективність сушіння, а й економічність використання матеріальних та енергетичних ресурсів.

При виборі раціональних режимів зневоднення з метою оптимізації енерговитрат, важливо виконувати розрахунковий аналіз тепломасообміну на основі математичних моделей. Тож, із застосуванням математичної моделі тепломасопереносу А.В. Ликова було побудовано відповідний чисельний алгоритм для моделювання цього процесу.

Розрахункові дослідження тепломасопереносу в колоїдному капілярно-пористому матеріалі, що відносяться до процесів конвекційного сушіння рослинної сировини виконуються на основі чисельного розв'язання системи рівнянь [78], до якої входять:

- рівняння переносу вологи

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \text{div}(a_m \cdot \text{grad}(U)) + \text{div}(a_m \delta_t \cdot \text{grad}(T)) \quad (1)$$

- рівняння переносу енергії

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + r\varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (2)$$

де U , кг/м³ - питомий вологовміст матеріалу (сумарна маса рідкої вологи та водяної пари в одиниці об'єму матеріалу); T , К - температура; τ , с - час; a_m , м²/с - коефіцієнт дифузії вологи в капілярно-пористому матеріалі; δ_t , кг/(м³К) - термоградієнтний коефіцієнт; c , Дж/(кгК) - ефективна теплоємність матеріалу; ρ , кг/м³ - ефективна густина матеріалу; λ - ефективна теплопровідність матеріалу; r , Дж/кг - питома теплота випаровування; ε - коефіцієнт фазового перетворення, який характеризує відношення потоку водяної пари до сумарного потоку рідкої вологи та потоку пари. Його величина змінюється в межах від 0 до 1.

Чисельні дослідження виконуються для випадку конвекційного сушіння зразка колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Даний процес передбачає підвід теплоти конвекцією від розігрітого повітряного потоку до матеріалу, що висушується. Зразок матеріалу, що має форму прямокутного паралелепіпеда, розміщується в сушильній камері, у яку подається розігрітий теплоносіє.

Задача тепломасопереносу розглядається в наближеній одновимірній постановці. Процес вважається симетричним відносно площини симетрії прямокутного зразка. Для випадку відносно малої товщини зразка d , а також при невисоких градієнтах температури, переносом вологи термодифузиею можна знехтувати. За даних припущень систему рівнянь (1), (2) доцільно представити у вигляді

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial U}{\partial x} \right); \quad (3)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + r\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (4)$$

де x - напрямок від площини симетрії зразка, де $x=0$, до поверхні тепломасообміну, для якої $x=d/2$.

Граничні умови до рівнянь (3), (4) на поверхні тепломасообміну мають вигляд:

$$-a_m \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}); \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \alpha(T_w - T_\infty) + r(1 - \varepsilon_w)\beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) \quad (6)$$

де $C_{v,w}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії біля поверхні тепломасообміну; $C_{v,\infty}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії на значній відстані від поверхні; T_w - температура поверхні тепломасообміну; T_∞ - температура теплоносія на значній відстані від поверхні; α , Вт/(м²К) - коефіцієнт тепловіддачі; β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі.

Граничні умови на площині симетрії мають вигляд

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (8)$$

Умова (5) встановлює рівність між сумарним потоком рідкої та пароподібної вологи, що надходить до поверхні з середини матеріалу, та потоком, що видаляється з поверхні матеріалу та надходить до теплоносія. В правій частині виразу (5) міститься різниця між відносною концентрацією водяної пари у повітрі біля поверхні тепломасообміну ($C_{v,w}$) та відносною концентрацією водяної пари в теплоносії на значній відстані від цієї поверхні ($C_{v,\infty}$). Величина $C_{v,\infty}$ має бути відомою з початкових умов задачі, так само як і температура теплоносія T_∞ . Величина $C_{v,w}$ визначається в ході розв'язання задачі в залежності від вологісного стану поверхні матеріалу. Як запропоновано в [6], у випадку, коли вологовміст матеріалу біля поверхні масообміну перевищує величину максимального гігроскопічного вологовмісту, концентрація водяної пари визначається з умов для насиченої пари, що відповідають температурі цієї поверхні. Якщо вологовміст матеріалу біля поверхні менший за максимальне гігроскопічне значення, концентрація водяної пари визначається з ізотерми сорбції за величинами вологовмісту матеріалу біля поверхні та температури цієї поверхні.

Ізотерми сорбції зазвичай представляються у вигляді експериментально визначеної залежності рівноважної концентрації рідини у зразку W від відносної вологості повітря $\phi = p_v/p_{v,s}$. Для її застосування при розв'язанні системи рівнянь (3), (4) цю залежність доцільно перебудувати у вигляді залежності рівноважного питомого вологовмісту матеріалу U від відносної концентрації водяної пари у повітрі $C_{v,w} = \rho_{v,w}/(\rho_{v,w} + \rho_{a,w})$. Для цього за величиною питомого вологовмісту на поверхні U_w визначається відносна концентрація вологи у матеріалі

$$W_w = \frac{U_w}{U_w + m_c/V}, \quad (9)$$

де m_c - маса сухого матеріалу; V - об'єм зразка.

За значеннями W_w та температури поверхні T_w по ізотермі сорбції визначається відповідна величина відносної вологості повітря ϕ . Далі відповідне значення відносної концентрації водяної пари в повітрі розраховується за формулою:

$$C_{v,w} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\phi p_{v,s}(T_w)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}}, \quad (10)$$

де p_0 - тиск у пароповітряній суміші, p_v - парціальний тиск водяної пари, $p_{v,s}$ парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_w , R_v , R_a - газові сталі для водяної пари та сухого повітря відповідно.

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тепломасообміну визначається з відповідного рівняння подібності, що враховує режим течії теплоносія. У випадку, коли горизонтальний плоский зразок омивається турбулентним повітряним потоком, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі можна скористатися рівнянням [7]:

$$Nu_l = 0,037 Re_l^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_a / Pr_w)^{0,25} \quad (11)$$

де $Nu_l = \frac{\alpha l}{\lambda_a}$ - осереднене по поверхні теплообміну довжиною l число Нуссельта, $Re = \frac{u_\infty l}{\nu_a}$ - число Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a}$ - число Прандтля для повітря, u_∞ - швидкість незбуреного повітряного потоку; ν_a - кінематичний коефіцієнт в'язкості для повітря.

Коефіцієнт масовіддачі β можна за аналогією між теплопереносом та масопереносом визначити з наближеного співвідношення

$$\beta \approx \frac{\alpha}{C_a} \quad (12)$$

На відміну від граничних умов теплообміну третього роду на поверхні сухого матеріалу, граничні умови (6) для вологого матеріалу враховують теплоту випаровування рідкої вологи з поверхні. Ця теплота визначається другою складовою, що входить у праву частину виразу (6). Коефіцієнт фазового перетворення $\mathcal{E}_w$ на поверхні тепломасообміну, що входить до граничної умови (6), визначає співвідношення між потоком водяної пари, що надходить до поверхні з середини зразка, до сумарного потоку пари та рідкої вологи. Якщо поверхня перезволожена, як це в ряді випадків має місце на початковій стадії сушіння, коефіцієнт $\mathcal{E}_w$ можна прийняти рівним нулю. Це означає, що водяна пара утворюється лише на самій поверхні тепломасообміну і не надходить до поверхні з середини зразка.

На заключній стадії сушіння, коли поверхня майже висушена, а випаровування здійснюється в глибинних шарах зразка, коефіцієнт $\mathcal{E}_w$ матиме значення, близьке до одиниці. Це означає, що до поверхні тепломасообміну волога з середини зразка надходить лише у вигляді водяної пари. В цьому випадку фазового перетворення на самій поверхні не відбувається.

У цілому ж точне визначення величини $\mathcal{E}_w$ може бути достатньо проблематичним. В першому наближенні можна прийняти $\mathcal{E}_w = 0$, коли відносна вологість матеріалу біля поверхні тепломасообміну перевищує максимальне гігроскопічне значення, яке відповідає $\phi = 100\%$ і температурі поверхні матеріалу. Якщо відносна вологість матеріалу біля поверхні менша за максимальну гігроскопічну вологість, можна припустити, що значення $\mathcal{E}_w \sim 1$.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь (3), (4) з граничними умовами (5) - (8) застосовується метод скінчених різниць. Для його використання розрахункова область $0 \leq x \leq d/2$ розподіляється на m кроків довжиною $\Delta x = d/(2m)$. В середині кожного кроку визначаються розрахункові вузли, у яких записуються дискретні аналоги диференціальних рівнянь (3), (4). Таким чином будується різницева розрахункова сітка. Скінчено-різницеві рівняння складаються за неявною часовою схемою [8] і мають вигляд:

$$\frac{U_{k,i} - U_{k-1,i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{\Delta x} \left((a_m)_{k-1,i+1/2} \frac{U_{k,i+1} - U_{k,i}}{\Delta x} - (a_m)_{k-1,i-1/2} \frac{U_{k,i} - U_{k,i-1}}{\Delta x} \right); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (C\rho)_{k-1,i} \frac{T_{k,i} - T_{k-1,i}}{\Delta \tau} &= \frac{1}{\Delta x} \left((\lambda)_{k-1,i+1/2} \frac{T_{k,i+1} - T_{k,i}}{\Delta x} - (\lambda)_{k-1,i-1/2} \frac{T_{k,i} - T_{k,i-1}}{\Delta x} \right) + \\ &+ \frac{r_{k-1,i} \mathcal{E}_{k-1,i}}{\Delta x} \left((a_m)_{k-1,i+1/2} \frac{U_{k,i+1} - U_{k,i}}{\Delta x} - (a_m)_{k-1,i-1/2} \frac{U_{k,i} - U_{k,i-1}}{\Delta x} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

де k - номер поточного дискретного кроку за часом; $k-1$ - номер попереднього кроку за часом; i - номер кроку за просторовою змінною x ($1 \leq i \leq m$), $\Delta\tau$ - крок за часом. Дробові індекси при коефіцієнтах рівнянь означають, що відповідна величина визначається, як напівсуми величин, що відносяться до сусідніх вузлів сітки.

Граничні умови (5)-(8) також представляються в скінчено-різницевій формі:

$$-(a_m)_{k-1,m+1/2} \frac{U_{k,m+1} - U_{k,m}}{\Delta x} = \beta [C_{v,w}(U_{k-1,m+1/2}; T_{k-1,m+1/2}) - C_{v,\infty}] \quad (14)$$

$$-(\lambda)_{k-1,m+1/2} \frac{T_{k,m+1} - T_{m,i}}{\Delta x} = \alpha \left[\left(\frac{T_{k,m+1} + T_{m,i}}{2} \right) - T_{\infty} \right] + r(1 - \varepsilon_w) \beta [C_{v,w}(U_{k-1,m+1/2}; T_{k-1,m+1/2}) - C_{v,\infty}]; \quad (15)$$

$$U_{k,0} = U_{k,1} \quad (16)$$

$$T_{k,0} = T_{k,1} \quad (17)$$

Система різницевих рівнянь (12), (13) з граничними умовами (14)-(17) розв'язується методом прогонки [8]. Початковими умовами до нестационарних рівнянь (12), (13) є вихідні розподіли температури T та питомого вологовмісту U . Для розв'язання задачі задаються також швидкість u_{∞} , температура T_{∞} та відносна вологість теплоносія ϕ_{∞} . Коефіцієнти дифузії a_m , теплопровідності λ , теплоємності c , а також густина ρ і теплота випаровування r , що входять до рівнянь (12)-(17) зазвичай залежать від вологовмісту та температури матеріалу, тобто від невідомих величин, що входять до цих рівнянь. Тому значення цих коефіцієнтів визначаються за величинами $U_{k-1,i}$ та $T_{k-1,i}$, що відносяться до попереднього часового кроку. Надалі значення цих коефіцієнтів уточнюються.

За наведеним методом виконується чисельне моделювання процесу конвекційного сушіння зразка ККПМ товщиною $d=10$ мм та площею поверхонь, з яких видаляється волога, $F=1000$ мм². Швидкість повітряного потоку в сушильній камері $u_{\infty}=3,5$ м/с, його температура $T_{\infty}=60$ °С, відносна вологість $\phi_{\infty}=4,7$ %. За цих умов $C_{v,\infty}=0,0057$. Початкова маса зразка $m_0=9,786$ г. Його початкова температура $T_0=26,6$ °С. Маса сухого матеріалу $m_c=1,41$ г. Початковий питомий вологовміст складає $U_0=837,6$ кг/м³. Теплофізичні властивості зразка приймаються такими, як рекомендовано в [9]. Залежності рівноважного вологовмісту рослинної сировини від відносної вологості повітря (криві сорбції) були визначені експериментально.

За наведеними вихідними даними крім розрахункових досліджень проведено також експериментальні дослідження з метою порівняння їх результатів. Експеримент з висушування досліджуваного зразка проводився протягом 90 хв.

Для виконання розрахунків будується різницева сітка, що містить $m=100$ кроків на половині товщини зразка $d/2$. Крок за часом складає $\Delta\tau=1$ с. В результаті чисельного моделювання одержано розподіли по товщині зразка температури (рис. 1) та питомого вологовмісту (рис. 2) в різні моменти часу.

Як видно з рис. 1 та 2, найбільш інтенсивно зміна у часі температури та питомого вологовмісту відбувається на поверхні тепломасообміну ($x=5$ мм).

Зміну у часі температури та вологовмісту на поверхні тепломасообміну наведено на рис. 3 та 4 відповідно. На рис. 3 наведено також порівняння результатів розрахунків за наведеною моделлю (крива 2) з результатами експерименту (крива 1). Як видно з цього рисунку, збіг результатів розрахунків температури поверхні з результатами експерименту достатньо задовільний.

З рисунку також видно, що найбільш інтенсивна зміна температури поверхні відбувається протягом перших 20 хв. Найбільш інтенсивна зміна вологовмісту поверхні відбувається протягом перших 30 хв.

За визначеною величиною питомого вологовмісту розраховується також зміна у часі сумарної маси вологи у досліджуваному зразку $m_w(\tau)$.

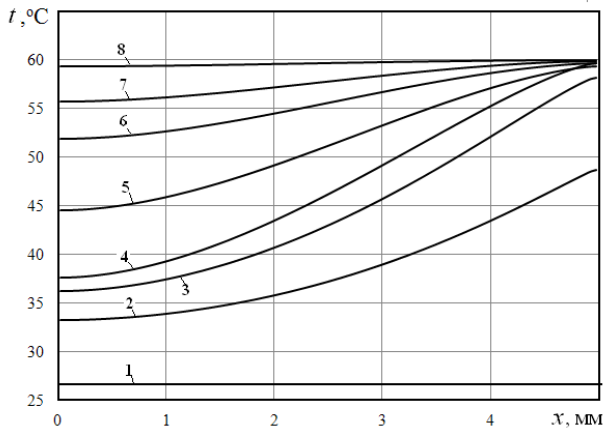


Рис. 1. Розподіл температури по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні:

1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв.; 3 – 20 хв.; 4 – 30 хв.; 5 – 40 хв.; 6 – 50 хв.; 7 – 60 хв.; 8 – 90 хв.

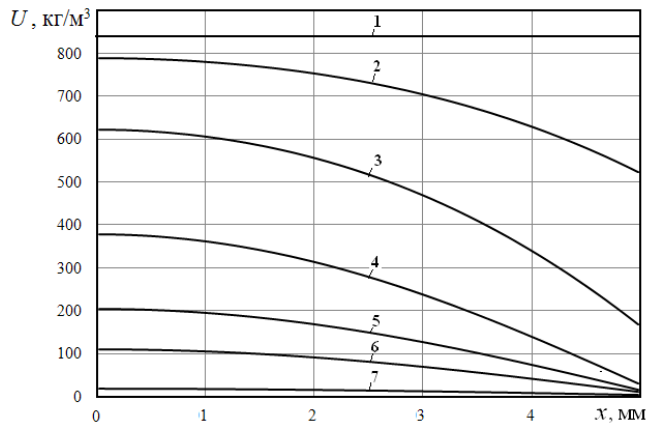


Рис. 2. Розподіл вологовмісту по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні:

1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв.; 3 – 20 хв.; 4 – 30 хв.; 5 – 40 хв.; 6 – 50 хв.; 7 – 80 хв.

$$m_w = F \cdot \int_0^{d/2} U(x) dx \quad (18)$$

На рис. 5 наведено залежність цієї величини від часу (крива 2) та зміну у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку, що отримана з експериментальних досліджень (крива 1). Як видно з порівняння цих кривих, на початкові стадії сушіння ($\tau < 25$ хв.) маса води в зразку, що одержана з розрахунків, менша, ніж та, що визначена з експерименту. На наступній стадії сушіння розрахункове значення маси води стає меншим, ніж експериментальне.

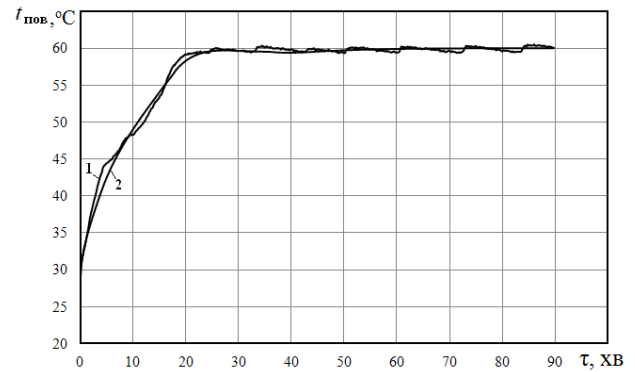


Рис. 3. Зміна у часі температури поверхні зразка: 1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

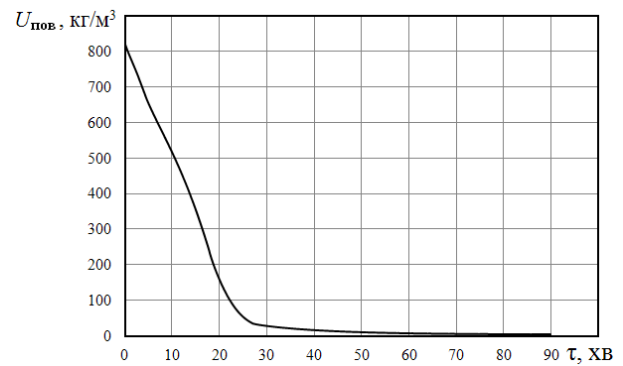


Рис. 4. Зміна у часі вологовмісту на поверхні зразка

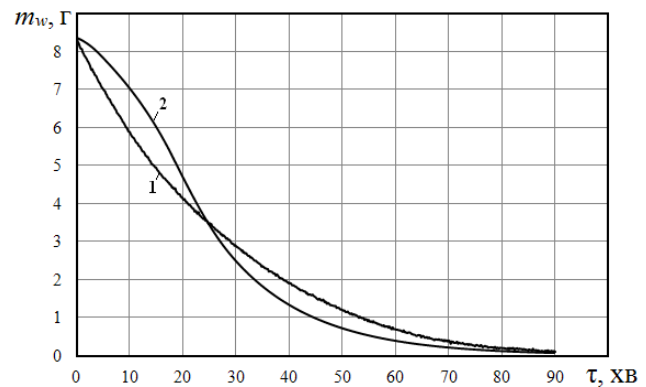


Рис. 5. Зміна у часі маси води у зразку, що досліджується:

1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

Визначається також зміна у часі відносної концентрації води у зразку $w(\tau)$:

$$w = \frac{m_w}{m_w + m_c} \quad (19)$$

Зміну у часі значень цієї величини, що отримані з розрахунків та з експерименту, представлено на рис. 6.

З порівняння розрахункових та експериментальних даних випливає, що за даною чисельною моделлю процес сушіння на початковій стадії протікає дещо повільніше, ніж це випливає з експерименту. Надалі інтенсивність висушування матеріалу, що визначається з розрахунків, виявляється більшою, ніж та, що одержана з експерименту.

За результатами розрахункових досліджень визначається також швидкість конвекційного сушіння досліджуваного зразку $\frac{dm_w}{d\tau}$.

Залежність цієї величини від часу наведено на рис. 7. Як видно з рисунку, на початковій стадії сушіння швидкість цього процесу зростає. Найбільша швидкість сушіння зразка $\frac{dm_w}{d\tau} = 0,275$ г/хв спостерігається при $\tau = 20$ хв. Далі швидкість сушіння починає спадати.

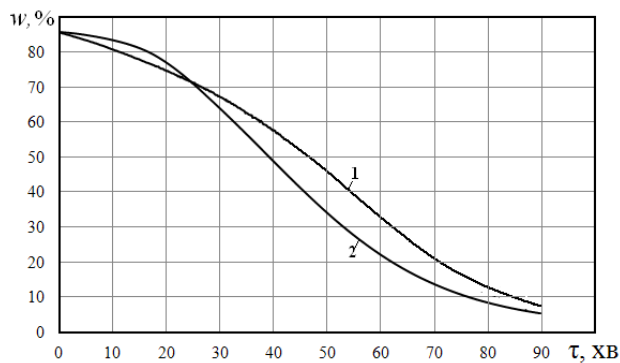


Рис. 6. Зміна у часі відносної концентрації вологи у зразку:

1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

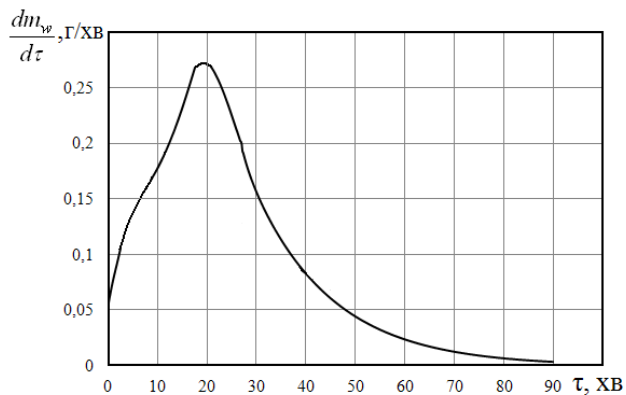


Рис. 7. Залежність від часу швидкості сушіння досліджуваного зразка

Даний характер зміни у часі швидкості сушіння пояснюється тим, що, як випливає з залежності (5), густина потоку маси з поверхні зразка зростає зі збільшенням відносної концентрації водяної пари $C_{v,w}$ біля цієї поверхні. Ця величина збільшується з ростом температури поверхні $t_{пов}$ та зменшується зі зниженням відносної концентрації вологи на поверхні $w_{пов}$.

Оскільки в процесі конвекційного сушіння водночас зростає температура поверхні і зменшується її вологовміст, величина $C_{v,w}$ залежатиме від того, який саме з цих двох параметрів суттєвіше на неї впливає в даний момент часу. Таким чином, від початку сушіння величина $C_{v,w}$ зростає і при $\tau = 20$ хв набуває максимального значення, а далі з часом починає спадати.

Швидкість зміни у часі відносної вологості зразка $\frac{dW}{d\tau}$ має аналогічний характер (рис. 8). Але максимального значення $\frac{dW}{d\tau} = 1,54$ %/хв. ця величина набуває при $\tau = 38$ хв.

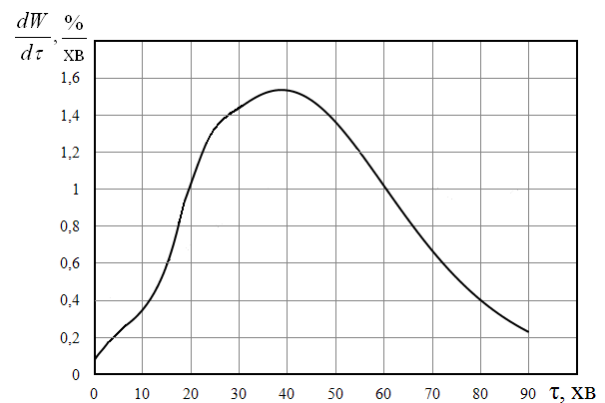


Рис. 8. Залежність від часу швидкості зміни відносної вологості зразка

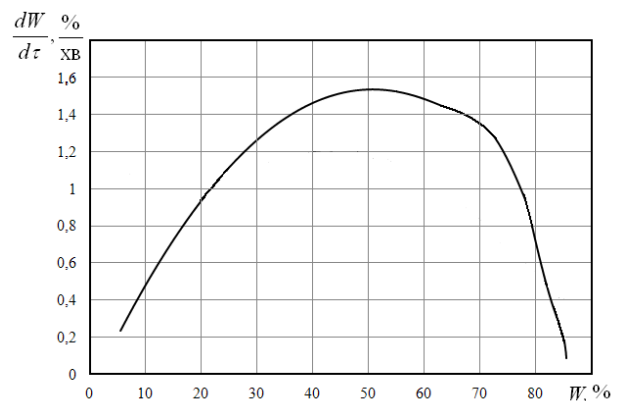


Рис. 9. Залежність швидкості зміни відносної вологості зразка від величини відносної вологості

За результатами розрахункових досліджень будується також залежність швидкості сушіння $\frac{dW}{d\tau}$ від величини самої відносної вологості (крива сушіння). Ця залежність наведена на рис. 9. Як видно з рисунку, максимального значення $\frac{dW}{d\tau} = 54 \text{ \%}/\text{хв}$ дана величина набуває при $W=51\%$.

Порівняння результатів чисельного моделювання процесів конвекційного сушіння досліджуваного зразка з експериментальними результатами показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Водночас спостерігається певна розбіжність у кількісних показниках даних результатів. Отже, розглянута розрахункова модель може бути використана для наближеного визначення характеристик процесу сушіння рослинної сировини, зокрема часу.

Для визначення характеристик процесу конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів, крім чисельного моделювання даного процесу також були проведені експериментальні дослідження кінетики сушіння культивованих грибів *Pleurotus eryngii*.

На рис. 10 представлена порівняльна характеристика режимів зневоднення з метою визначення найбільш ефективних.

Найменший час сушіння 75 хв відповідає режиму сушіння із температурою теплоносія 100°C (крива 4,4'). Проте, як відомо, при цьому руйнуються всі біологічно активні речовини досліджуваних зразків. Комбінований

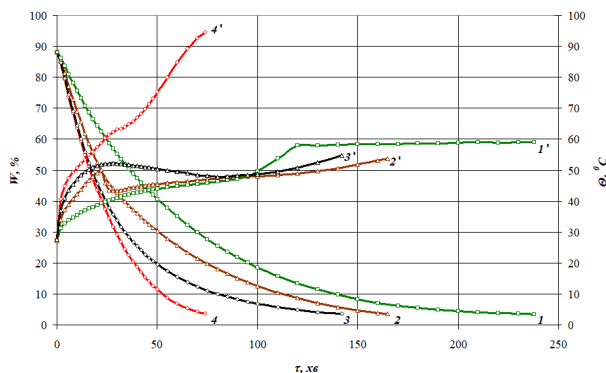


Рис. 10. Вплив різних режимів на тривалість сушіння грибів *Pleurotus eryngii*

$v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

1,1' – конвективне сушіння 60°C ;

2,2' – комбіноване сушіння $100\text{Вт}+60^\circ\text{C}$;

3,3' – конвективне двоступеневе сушіння $100/60^\circ\text{C}$;

4,4' – конвективне сушіння 100°C

метод в даному випадку – це поєднання інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) 100Вт та конвективного 60°C в одному режимі (крива 2,2'). На початку процесу було одночасно увімкнено два види енергоносії.

При досягненні температури матеріалу 50°C на 20 хв, джерело ІЧВ було вимкнено. При цьому спостерігається різке зниження температури матеріалу, яка вже на 27 хв процесу становила 43°C .

Далі нагрів матеріалу відбувається поступово. Тривалість сушіння при комбінованому методі становить 160 хв та при цьому відбувається інтенсифікація процесу сушіння у 1,5 р у порівнянні із режимом 60°C .

При режимі конвективного двоступеневого сушіння $100/60^\circ\text{C}$ (крива 3,3') на початку процесу температура теплоносія становила 100°C , температура матеріалу $20-22^\circ\text{C}$. Температуру теплоносія тримали аж до поки температура матеріалу не досягнула 48°C .

Далі температура теплоносія була знижена до 60°C , проте температура матеріалу продовжувала зростати по інерції до 53°C , оскільки зниження температури теплоносія відбувається через певний проміжок часу поступово. Далі температура матеріалу повільно знижується аж до 49°C на 85 хв із подальшим зростанням до кінця процесу. За весь період експерименту температура матеріалу не перевищувала 55°C . Як видно з графіку, цей режим є найбільш оптимальним, оскільки відбувається інтенсифікація в 1,7 р. швидше, ніж режим 60°C .

Як видно із кривих швидкості сушіння (рис. 11), найбільша швидкість процесу у режимів 100°C та $100/60^\circ\text{C}$ (криві 3 та 4) становить $2,6-2,7 \text{ \%}/\text{хв}$. А швидкість сушіння при комбінованому $2,2\text{ \%}/\text{хв}$. При

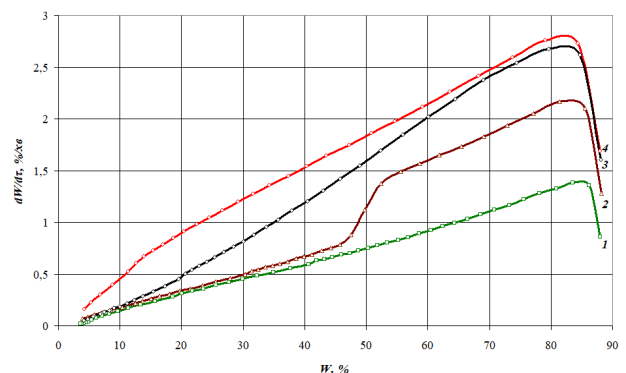


Рис. 11. Вплив різних режимів на швидкість сушіння грибів *Pleurotus eryngii* $v=3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

1 – конвективне сушіння 60°C ;

2 – комбіноване сушіння $100\text{Вт}+60^\circ\text{C}$;

3 – конвективне двоступеневе сушіння $100/60^\circ\text{C}$;

4 – конвективне сушіння 100°C

чому, швидкість сушіння конвективного двоступеневого 100/60°C є значно вища, ніж комбінованого методу (криві 2, 3 на рис. 11).

Незворотність термодинамічних процесів, що відбуваються під час сушіння призводить до незворотних змін не лише на рівні розсіювання енергії, але і в самому зневодненому матеріалі. До основних характеристик, що достатньо об'єктивно дають оцінку якості сушеної продукції і відповідно правильності підбора режимів зневоднення слід віднести: залишковий вологовміст продукції, гігроскопічні властивості, значення відновлення, втрата вітамінів при зневодненні, колір тощо [10].

Найбільш важливим показником якості сушеної продукції є її здатність до відновлення та коефіцієнт набухання - це показник якості, що показує наскільки харчовий продукт здатен відновлюватись після сушіння та дорівнює відношенню об'єму набухлої породи до її максимально первісного об'єму.

Тому, після експериментальних досліджень кінетики сушіння культивованих грибів *Pleurotus eryngii*, важливо було дослідити регідраційні властивості досліджуваного матеріалу. Найнижчий показник коефіцієнту набухання культивованих грибів *Pleurotus eryngii* є при конвективному режимі зневоднення 100 °C – 4,45 % та при режимі ІЧВ 100 Вт на конвективному сушильному стенді – 4,3 %. При режимі 60 °C коефіцієнт набухання становить 5,09%, а при ефективних режимах комбінованому інфрачервоно-конвективному 100 Вт + 60 °C, конвективному двохстадійному 100/60 °C близько 6,11 %.

Висновки. Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння показує, що застосовуючи чисельне моделювання шляхом моделі А.В. Ликова, можливо задовільно описати процес тепломасопереносу, а також результати розрахунку можна застосовувати для орієнтовного визначення параметрів зневоднення.

Щодо експериментальних досліджень сушіння та якісних характеристик культивованих грибів *Pleurotus eryngii*, рекомендовано при сушінні культивованих грибів використовувати комбінований інфрачервоно-конвективний режим зневоднення, при якому якісні показники мають високі значення. Отже, теоретичний розрахунок дозволяє найбільш раціонально підійти до експериментальних досліджень та переробки культивованих грибів *Pleurotus eryngii* із подальшим використанням в харчовій промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yuxi Guo, Xuefeng Chen, Pin Gong, Ruotong Wang, Zhuoya Qi, et al. (2023) Advances in Postharvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus eryngii*. *Foods*, 12, 1046 p. <https://doi.org/10.3390/foods12051046>
2. Zhang, B.; Li, Y.; Zhang, F.; Linhardt, R.J.; Zeng, G.; Zhang, A. (2020) Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 150, p. 1342–1347. [CrossRef]
3. Rui-Lin Yang, Qin Li & Qing-Ping Hu (2020) Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports* 10:121 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>
4. He Liu, Junhua Jiao, You Tian, Jia'ao Liu, Pei Yuan, and Xuehong Wu (2022) Drying kinetics of *Pleurotus eryngii* slices during hot air drying. *Open Physics*; 20: p. 265–273. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0029>
5. Tong Lil . Jo-Won Lee1 . Li Luo1 . Jongkee Kim2 . BoKyung Moon (2018) Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Appl Biol Chem*, 61(3), p. 257–265.
6. Dolinskiy A. A., Dorfman A. Sh., Davydenko B. V. (1991) Conjugate heat and mass transfer in continuous processes of convective drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991.V.34, № 11. P. 2883–2889.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. (1977) Основы теплопередачи. М. «Энергия», 320 с.
8. Калиткин Н.Н. (1978) Численные методы. М. «Наука». 1978. 512 с.
9. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. (1980) Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: «Пищевая промышленность», 288 с.
10. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. (2007) Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. Київ: ВД «Академпериодика». 162 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DRYING KINETICS OF COLLOID CAPILLARY-POROUS MATERIALS AS DRYING OBJECTS

Davydenko B.V.¹, Samoilenko K.M.²

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str.,
Kyiv, 03057, Ukraine*

¹Dr. Sci. (Engin.), e-mail: bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>

²PhD (Engin.), katernasamoilenkoitf@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5169-4466>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.5>

Considering the current situation in the energy sector of Ukraine, the urgent need to improve and develop energy-efficient thermal technologies for dehydration of plant raw materials is urgent and timely, which would ensure minimal energy consumption and high quality of the final product. The processing of vegetable raw materials into dried products is important for the sustainable development of the food industry. Cultivated *Pleurotus eryngii* mushrooms, which are valued for their high content of protein, carbohydrates, unsaturated fatty acids, vitamins and other nutrients, etc., are increasingly relevant in the mushroom industry on the world food market.

It is important, in order to optimize energy consumption during dehydration and to select rational equipment, in addition to experimental studies, to perform theoretical calculation analysis of heat and mass transfer based on mathematical models.

The article provides a theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of colloidal capillary-porous materials. To determine the characteristics of the convective drying process, in addition to experimental studies, numerical modeling of this process was performed, which is performed on the basis of the numerical solution of the system of heat and mass transfer equations in colloidal capillary-porous materials. The calculation model can be used for the approximate determination of the main characteristics of the drying process of colloidal capillary-porous materials.

Ref. 10, fig. 11.

Keywords: heat and mass transfer, drying, colloidal capillary-porous materials, cultivated mushrooms *Pleurotus eryngii*.

1. Yuxi Guo, Xuefeng Chen, Pin Gong, Ruotong Wang, Zhuoya Qi, et al. (2023) Advances in Postharvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus eryngii*. *Foods*, 12, 1046 p. <https://doi.org/10.3390/foods12051046>

2. Zhang, B.; Li, Y.; Zhang, F.; Linhardt, R.J.; Zeng, G.; Zhang, A. (2020) Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 150, p. 1342–1347. [CrossRef]

3. Rui-Lin Yang, Qin Li & Qing-Ping Hu (2020) Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports* 10:121 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>

4. He Liu, Junhua Jiao, You Tian, Jia'ao Liu, Pei Yuan, and Xuehong Wu (2022) Drying kinetics of *Pleurotus eryngii* slices during hot air drying. *Open Physics*; 20: p. 265–273. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0029>

5. Tong Lil . Jo-Won Leel . Li Luo1 . Jongkee Kim2 . BoKyung Moon (2018) Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Appl Biol Chem*, 61(3), p. 257–265.

6. Dolinskiy A. A., Dorfman A. Sh., Davydenko B. V. (1991) Conjugate heat and mass transfer in continuous processes of convective drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991.V.34, № 11. P. 2883–2889.

7. M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. (1977) Fundamentals of heat transfer. M. "Energy", 320 p. (in rus).

8. Kalitkin N.N. (1978) Numerical methods. M. "Science". 1978. 512 p. (in rus).

9. Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovskaya G.I. (1980) Thermophysical characteristics of food products. Directory. M.: "Food Industry", 288 p. (in rus).

10. Sniezshkin Yu.F., Petrova Zh.O. (2007) Heat and mass exchange processes during the production of carotene-containing powders. Kyiv: VD "Akademperiodika". 162 p. (in Ukr).

Отримано 31.01.2024

Received 31.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 661.961

РЕАЛІЇ СЬОГОДЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МАЙБУТНЬОГО РОЗВИТКУ
ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

Ободович О.М.¹, докт. тех. наук, Переяславцева О.О.², канд. техн. наук, Целень Б.Я.³, канд. техн. наук,
Резакова Т.А.⁴, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна

¹завідувач відділу, професор, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²пров.н.с, ст.н.с., e-mail: alena_p11@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-2646-8600>

³пров.н.с, ст.н.с., e-mail: b0d@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

⁴пров.н.с, ст.н.с., e-mail: rezakova_ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.6>

В огляді аналізується розвиток ринку водневої енергетики, обговорюються національні програми підтримки цієї нової галузі світової енергетики та пілотні водневі проекти. Розглядаються питання виробництва, споживання, акумулювання, зберігання та транспортування водню. Представлені результати виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України щодо створення нових матеріалів, технологічних процесів, конструкцій та систем, які могли б стати основою для широкого впровадження в Україні водневих технологій. Надано оцінку стану світового та українського ринків водню та перспективи їх розвитку на найближчі роки.

The review analyzes the development of the hydrogen energy market, discusses national programs to support this new field of global energy and pilot hydrogen projects. Issues of production, consumption, accumulation, storage and transportation of hydrogen are considered. The results of the targeted comprehensive program of scientific research of the National Academy of Sciences of Ukraine regarding the creation of new materials, technological processes, structures and systems that could become the basis for the widespread introduction of hydrogen technologies in Ukraine are presented. An assessment of the state of the world and Ukrainian hydrogen markets and the prospects for their development in the coming years is provided.

Бібл. 13, табл. 4.

Ключові слова: водень, воднева енергетика, декарбонізація, інфраструктура водню, ринок водню, прогноз розвитку ринку.

Воднева енергетика лише зароджується в світі, причому – в найбільш розвинених країнах. Сьогодні їхні уряди активно інвестують у розробки технологічних моделей водневої енергетики. А світові експерти в галузі енергетики називають водень «паливом майбутнього».

Водень – надзвичайно енергоємний ресурс. Він горить при такій же температурі, як і природний газ. Водночас, при згорянні речовини на одиницю маси виділяється майже в 3,5 рази більше тепла, ніж коли згоряють вуглеводні нафти чи вугілля. Водневе паливо – набагато більш ефективно, ніж дизельне, або авіаційне паливо. Цей ресурс можна транспортувати як трубопроводами (з тією ж швидкістю, що й вуглецеве), так і за допомогою ємностей для стисненого, або зрідженого газу, – при наднизьких температурах.

Потенційний ефект цієї технології важко переоцінити. Використання водню як альтернативного енергетичного носія й ресурсу не лише зменшить залежність

економік від викопного палива (вугілля, газ, нафта), а й суттєво скоротить викиди парникових газів, які спричиняє стара «вуглеводнева» економіка.

Водень у чистому вигляді або у поєднанні з деякими іншими видами палива можна ефективно перетворювати на енергію. При горінні водню утворюється лише чиста вода, яка залучається до повторного водневого циклу [1]. Сам водень належить до найпоширеніших елементів на поверхні землі й у космосі, але він не є первинним джерелом енергії, оскільки не зустрічається у вільному вигляді у традиційних природних родовищах. Водень в основному використовується не як паливо, а як вихідна промислова сировина, в першу чергу для отримання аміаку, метанолу, а також у нафтопереробці.

Енергетична цінність водню вища, ніж у метану (теплота його згорання становить 120 МДж/кг порівняно з 56 МДж/кг у метану), що викликає інтерес застосування водню як паливо для транспортних засобів. Однак якщо

вагова енергетична щільність водню висока, то за обсягом цей показник низький (навіть коли водень сильно стиснутий або перебуває в рідкому стані, його енергетична щільність за обсягом становить лише частину цього показника для бензину). Єдиний і суттєвий недолік водню полягає в тому, що він є одним з найвідоміших вибухо- та пожежонебезпечних сполук і його застосування пов'язане із серйозними обмежувальними стандартами, особливо при його використанні як палива.

На даний час домінує вуглецева енергетика, транспорт в основному працює на нафтовій сировині, а опалення виробляється за рахунок природного газу, при цьому попит на ці енергетичні продукти зростає, особливо в Китаї, Індії та багатьох інших країнах. Водень може стати екологічно чистим джерелом енергії для кінцевих споживачів без виділення в атмосферу таких шкідливих домішок, як завись вихлопних газів або діоксид вуглецю. Підраховано, що для того, щоб до 2050 р. уповільнити приріст потепління до 2 градусів на рік, потрібно буде перевести 400 млн. приватних автомобілів, 15...20 млн. вантажівок і 5 млн. одиниць громадського транспорту на водневе паливо, на що у світі будуть потрібні щорічні інвестиції у розмірі 20...25 млрд. доларів [2]. Декарбонізація та низьковуглецевий розвиток є основним трендом нинішньої світової енергетики. Провідні країни світу, окремі регіони та великі корпорації декларують свої довгострокові стратегічні цілі щодо зниження викидів парникових газів (або вуглецевого сліду у продукції) для боротьби з глобальними змінами клімату (табл.1) [3].

До десятки лідерів за абсолютними значеннями викидів парникових газів входять такі країни, як Китай, США, Індія, Росія, Японія, Німеччина, Південна Корея, Іран, Саудівська Аравія та Канада, на частку яких у 2017 р. припало 67% загальних світових викидів [4].

Якщо в довгостроковій перспективі воднева енергетика розвиватиметься успішно, а її світовий ринок характеризуватиметься значними масштабами виробництва та постійним збільшенням попиту на його застосування, то згодом водень може стати універсальним, найдешевшим та екологічно чистим енергоносієм.

Метою цього огляду є аналіз основних тенденцій та критеріїв для успішного становлення глобальної водневої енергетики, а також розгляд стану та перспектив розвитку ринків світової та Української водневої енергетики, що зароджуються.

Національні водневі програми та пілотні проєкти

Провідні країни світу, окремі регіони та великі корпорації мають свою власну національну стратегію розвитку водневих технологій. У США, країнах ЄС, Великій Британії, Японії, Китаї, Південній Кореї та Австралії вже діють програми, спрямовані на побудову водневої енергетики та перехід до використання водневого палива на транспорті, електроенергетики та теплотехніки. Так, наприклад, щорічне фінансування прийнятої ще в 1970 роках водневої програми США US DOE Hydrogen and Fuel Cells Program зараз оцінюється в 120 млн. доларів; у Європейському Союзі діє загальноєвропейська ініціатива «Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking», створена у 2017 р., яка об'єднала 22 європейські країни та має проєкти загальною вартістю близько 1,8 млрд. євро на найближчі 5 років; обсяги державного фінансування японської програми "Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells", створеної в 2014 р., склали в 2017 р. близько 310 млн. євро, а загальний обсяг фінансування в Японії до 2040 р. Hydrogen Council готовий забезпечувати інвестиції в НІЩКР розгортання водневих ринків на рівні 1,9 млрд. євро на рік у період 2018 – 2022 років [3].

Табл. 1. Заявлені національні цілі щодо скорочення викидів парникових газів [3]

Країна	Декларовані скорочення викидів парникових газів
США	до 2025 р. скоротити викиди парникових газів на 26...28% від рівня 2005 р.
Канада	до 2030 р. – на 30% від рівня 2005 р.
Німеччина	до 2030 р. – на 40...45% від рівня 1990р., до 2050 р. – на 80...95%. г
Франція	до 2030 р. – на 40% від рівня 1990р.
Норвегія	до 2030р. – на 40% від рівня 1990р.
Бразилія	до 2025 р. – на 40...45% від рівня 2005р.
Мексика	до 2030 р. – на 40...45% від рівня 1990р.
Китай	до 2030 р. скоротити питомі викиди парникових газів на 1 дол. ВВП на 65% з виходом на пік за абсолютною величиною викидів не пізніше 2030 р.
Австралія	до 2030 р. – на 40...45% від рівня 1990р.

Політика підтримки розвитку технологій водневої енергетики в різних країнах багато в чому залежить від різниці в національних пріоритетах, включаючи такі показники як якість повітря, зміни клімату, енергетична безпека, доступність коштів, економічне зростання і т.д.

Наприклад, у США – це чистота повітря, що забруднюється транспортними засобами, у Китаї – якість повітря у густонаселених містах. Згідно з даними [5], у США обсяг бюджетних асигнувань на водневі проекти становить 1,7 млрд. доларів на 5 років (у кілька разів більше коштів надходить від приватних компаній), у Європейському Союзі – 2 млрд. євро, у Японії – 4 млрд. доларів на 20 років.

Відомо, що програма переходу на водневу енергетику в Японії складається з декількох стадій, які включають підтримку використання водневих паливних елементів в електромобілях, виробництво водню та паливних водневих елементів для житлових будівель, розробку та інтегрування водневих систем у загальну енергетичну систему до 2030 р. переходом на безвуглецеву водневу енергетику до 2040р.

У табл.2 наводяться дані щодо прогнозу споживання водню та водневих паливних елементів у ряді секторів ринку водневої енергетики (комбіновані теплові та енергетичні системи, водневі паливні елементи, водневі

заправні станції) на найближчі роки у шести провідних країнах, а в табл.3 – рівень фінансової підтримки для реалізації задуманих планів.

Основним стимулом розвитку ринку водневої енергетики в Європі є зниження емісії шкідливих газів, при цьому водень розглядається як дуже важлива складова державної стратегії. Такі країни, як Великобританія та Франція, планують до 2040 р. Припинити продаж нових автомобілів, що працюють на бензині та дизельному паливі, а Норвегія планує до 2025 року перевести весь пасажирський транспорт на електрику та водень.

У табл. 4 наведено сумарні показники кількості водневих установок на основних регіональних ринках станом на 2018 р.

У США кілька виробників автомобілів ухвалили рішення про створення транспортних засобів на основі водню, при цьому деякі відомі нафтохімічні компанії створюють спільні підприємства з виробництва водню різними методами, використовуючи для цього енергію вітру, сонця, електроліз води і т.д. Крім того, у США вже є розвинена система трубопроводів для природного газу, яку можна використовувати і для транспортування водню. Загалом у всіх країнах, де вже працюють транспортні засоби на основі природного газу, наприклад, в Ірані, Китаї, Пакистані, Індії, Аргентині,

Табл. 2. Сумарні дані щодо цільових показників використання водневих установок по ряду секторів ринку водневої енергетики у різних країнах [3]

Країна	Комбіновані системи тепла та енергії		Автомобілі з водневими паливними елементами			Водневі заправні станції		
	2020 р.	2030 р.	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2020 р.	2025 р.	2030 р.
Японія	1,4 млн.	5,3 млн.	40000	200000	800000	160	320	900
Німеччина	-	-	100% нульова емісія до 2040 р.	-	-	400	-	-
Китай	-	-	3000 (тільки для Шанхая)	50000	1 млн	100	1000	-
США	-	-	0	3,3 млн	-	100 (тільки для Каліфорнії)		
Південна Корея	-	1,2 МВт		100000	630000	100	210	520
Велика Британія	-		100% нульова емісія до 2040 р.	-	-	30	150	-

Табл. 3. Державні заходи підтримки для реалізації програм з енергетичного водню та водневих паливних елементів у 2017 р. [1]

Країна	Комбіновані системи тепла та енергії в житлах	Водневі паливні елементи транспортних засобів	Заправка воднем на станціях
Японія	93 млн.& 70-17000 &/од	147 млн.&	61 млн.&
Німеччина	13600 &/од	4000 & за транспортний засіб	466 млн.&
Китай	-	1700 & за кВ (до 57000 & за транспортний засіб)	1,1 млн. &/од.
США	1000/од. (до 3000 &/ кВ для великих систем)	до 13000 & за транспортний засіб	30% вартості (до 30000 &) у Каліфорнії 100 млн. & до 2023 р.
Південна Корея	5,3 млн	5,4 млн. (до 31000 за транспортний засіб)	-
Велика Британія	-	33 млн. (60% вартості для заправки)	-

Табл. 4. Кількість водневих установок у світі станом на 2018 рік [4]

Країна	Комбіновані системи тепла та енергії	Водневі паливні елементи транспортних засобів	Водневі заправні станції	Складські навантажувачі
Японія	223000	1800 автомобілів	90	21
Німеччина	12000	467 автомобілів 14 автобусів	33	16
Китай	1	60 автомобілів 50 автобусів	36	-
США	225 МВт	2750 автомобілів 33 автобусів	39 загальних, всього 70	11600
Південна Корея	177 МВт	100 автомобілів	11	-
Велика Британія	10	42 автомобілів 18 автобусів	14	2

Бразилії, Болівії є великі перспективи організації ефективного транспортування водневого палива.

Не тільки в США, а й у багатьох країнах Європейського Союзу (Бельгія, Німеччина, Франція, Нідерланди) також є розвинена мережа трубопроводів для подачі природного газу. У Великій Британії відповідно до національних пілотних водневих програм уже протестовано автобуси, що працюють на водневих паливних елементах, а спеціальна експедиція перевіряє можливості встановлення таких пристроїв

на морських судах. Раніше роботу автобусів на водневому паливі було протестовано в пілотному режимі в Австралії (водень надходив з нафтоперегінного заводу British Petroleum у містечку Kwinana (Перт, Австралія), де його отримували як побічний продукт). Відповідно до місцевих національних програм перевірка автобусів, що працюють на водневому паливі, зараз проводиться в Бельгії, Норвегії, Індії та Південній Кореї. Великі суми розвитку водневої енергетики інвестує Міністерство енергетики Туреччини (компанія Istanbul Sea Buses).

Можливість організації ефективного та безпечного транспортування водню тестується в рамках пілотних проектів у багатьох країнах США (шт. Каліфорнія, шт. Массачусетс), Канаді, Японії, країнах ЄС (Португалія, Норвегія, Данія, Німеччина) та Ісландії. Однак зараз підтверджується лише дуже висока вартість проектів.

Поки що глобальні інвестиції у водневу енергетику становлять, за різними оцінками, близько 0,85... 1,4 млрд євро/рік. Рада Hydrogen Council планує інвестувати 1,3 млрд. дол. протягом п'яти років у мережі водневих заправних станцій та водневі автомобілі. За даними DOE, сектор паливних елементів уже дає роботу 16000 громадянам (перспектива зростання – до 20000), а фінансова підтримка від державного бюджету США цьому сектору становить близько 100 млн. дол. на рік уже протягом багатьох років. У світі проводиться також велика робота щодо зниження вартості водневих виробництв, зокрема вартість отримання водню методом електролізу повинна зменшитися з 11,5 до 5,7 дол./кг. Також заплановано зменшення вартості паливних елементів (у 3...5 разів) та зберігання водню (у 2 рази) [6]. Питання полягає в тому, що зможе воднева енергетика як альтернатива витіснити вуглецеву енергетику, і які перспективи розвитку молодого ринку водневої енергетики на найближчі роки.

У ЄС проблемами водневої енергетики опікується переважно Європейська воднева і паливно-комірчана асоціація (Hydrogen Europe), яка поєднує близько 100 промислових компаній, 68 науково-дослідних організацій, 11 національних асоціацій (Бельгія, Болгарія, Велика Британія, Данія, Іспанія, Німеччина, Норвегія, Румунія, Угорщина, Швеція, Франція). Науковий супровід здійснюється в рамках програми «Горизонт-2020» із загальним фінансуванням на 2014-2020 рр. порядку \$665 млн.

В Україні першою програмою з цього напрямку була цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчаних технологій», яку було започатковано постановою Президії НАН України від 16.03.2016 р. №74. Протягом 2016-2018 рр., за цією програмою виконувалося 27 наукових проектів, у реалізації яких брали участь творчі колективи з 14 установ 5 відділень НАН України – Відділення фізики і астрономії; Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства; Відділення фізико-технічних проблем енергетики; Відділення хімії; Відділення біохімії, фізіології і молекулярної біології. Обсяг бюджетного фінансування програми за 3 роки становила 6408 тис. грн, або \$250 тис.

Дослідження виконувалися за трьома напрямками: 1) отримання водню з використанням відновлюваних джерел енергії; 2) зберігання водню; 3) паливні комірки, що дозволить вирішити низку фундаментальних і науково-технічних проблем сучасної водневої енергетики та паливно-комірчаних технологій.

В результаті виконання програми, за першим напрямком створено технології одержання водню з використанням електрохімічних, плазмохімічних і мікробіологічних методів, а також енергоакуючих речовин і каталізаторів. Досліджено можливості отримання водню з харчових відходів та з використанням відновлювальних джерел енергії. Зокрема, фахівцями ряду інститутів академії, а саме Інституту відновлювальної енергетики, Інституту мікробіології та вірусології ім. Д.К. Заболотного, Інституту біоорганічної хімії на нафтохімії ім. В.П. Кухаря, Інституту вугільних енерготехнологій, Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського, Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного:

- розроблено технологічні схеми отримання водню із застосуванням геотермальних джерел енергії, сонячного випромінювання та енергії вітру;

- здійснено термодинамічне обґрунтування та експериментальне підтвердження новітньої біотехнології отримання водню з одночасним знешкодженням екологічно небезпечних змішаних харчових відходів;

- сконструйовано і протестовано реверсну паливну комірку, що забезпечує отримання водню фотохімічним розкладанням води та дає змогу акумулювати отримуваний водень і використовувати його для генерації електричного струму;

- розроблено нові каталізатори на основі феритів магнію, марганцю і заліза, які виявляють високу каталітичну активність і селективність у процесі одержання водню паровим риформінгом

- запропоновано напрями технологічного використання водню для трансформації надлишку електричної енергії за допомогою електролізу води та робочі цикли перетворення енергії в замкнених схемах водневих установок.

На базі Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича у Переяславі-Хмельницькому створено демонстраційну систему для отримання водню з використанням енергії вітру.

Фахівці Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського та Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича розробили та запатентували фотоелектрохімічні комірки для отримання і накопичення водню. В Інституті відновлювальної

енергетики створено демонстраційну фотоелектричну систему для отримання водню електролізом води.

У межах другого напрямку проводились дослідження з метою пошуку шляхів вирішення проблем створення ефективних воденьакумулюючих матеріалів та ємностей для зберігання водню.

Досліджено водневу ємність, термічну стійкість, кінетику десорбції водню з отриманих механічних сплавів на основі магнію, перспективних для зберігання значної кількості водню. Такі накопичувачі водню можуть бути рекомендовані для використання у системах автономного енергозабезпечення та в комплексі з високотемпературними твердо оксидними паливними комірками. Також фахівцями Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича та Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного розроблено металогібридний акумулятор, визначено конструктивні розміри його складових та розроблено регламент експлуатації акумулятора залежно від інтенсивності зовнішнього теплового впливу. Сконструйовано та виготовлено ємності високого тиску – накопичувачі водню для паливних комірок.

Розроблено технологічний регламент на композитний матеріал для комбінованих високоємних ємностей для акумулювання, зберігання і використання водню та відповідне технічне завдання на розроблення конструкції балонів (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона).

Вченими Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича; Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка; Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова) розроблено нові воденьсорбуючі сплави на основі лантану, цирконію та нікелю як матеріали для металогібридних електродів. Вони легко активуються, мають високу ємність за воднем (до 300 мА·г/г) і низьку втрату максимальної розрядної ємності (менш як 5% у перших 30 циклах). Визначено термкінетичні параметри оборотного насичення воднем (наводнення і наступне видалення водню) порошкових лігатур систем, що містять, зокрема титан, алюміній, залізо. В Інституті хімії поверхні ім. О.О. Чуйка та Інституті газу методами квантової хімії встановлено закономірності взаємодії молекул водню з графеноподібними площинами.

Проведені дослідження за третім напрямом дозволили удосконалити електролітні матеріали для паливних комірок (ПК). Фахівцями Інституту проблем матеріалознавства І.М. Францевича; Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського; Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського створено мето-

дику стрічкового лиття і виготовлено пласкі керамічні паливні комірки (КПК) які є ефективнішими порівняно з комерційними аналогами; опрацьовано режими синтезу та спікання складних оксидних і металооксидних воденьпроникних матеріалів, які відповідно до вимірних характеристик можуть бути виконанні як компоненти ПК з протонною провідністю.

В Інституті загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського створено методику формування універсальних мембранно-електродних блоків (МЕБ) та виготовлено компоненти для батареї паливних комірок потужністю 5; 10; 100 і 200 Вт, а також макет дослідного зразка воднево-повітряної паливної батареї на 5 Вт.

Розроблено макет низькотемпературної паливної комірки з МЕБ на основі комерційної іон провідної мембрани «Нафіон». Відпрацьовані найбільш ефективні методи підготовки мембрани, нанесення каталізатора та формування МЕБ (Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського).

Розроблено склад композиту на основі МФХ-фаз (без кисневих керамік) титану для з'єднувальних елементів КПК, який продемонстрував високу міцність в інтервалі температур 20 – 600 °С і найвищу жаростійкість (Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка). Синтезовано протонообмінні мембрани, перспективні для використання як тверді поліелектроліти у водневих паливних комітках за температур понад 100 °С (Інститут хімії високомолекулярних сполук) [7].

Постановою Президії НАН України № 305 від 20.05.2019р. започатковано цільову комплексну програму фундаментальних досліджень НАН України «Розвиток наукових засад отримання, зберігання та використання водню в системах автономного енергозабезпечення» на 2019-2021 рр. метою якої є створення науково-технічних засад широкого впровадження ПК і водню в енергетичний сектор України. В ході виконання програми передбачається створити низку експериментальних зразків приладів, установок систем, які матимуть перспективу реалізації на підприємствах України з подальшим впровадженням в господарську практику.

Експерти Європейської економічної комісії ООН за підтримки Міненерго та Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України провели дослідження потенціалу водневих технологій в Україні. Результати показали доцільність запровадження водневої економіки, широкі можливості для цього, а також зиск від інфраструктури, сполученої з ЄС.

Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України повідомило, що відповідно до цілей Енергетичної стратегії України на період до

2035 року щодо встановлення потужностей ВЕС та СЕС, середньорічне виробництво «зеленого» водню в Україні може становити 5,5 млрд. кубометрів. Така потужність зможе забезпечити гнучкість роботи енергосистеми, декарбонізацію промисловості та транспортного сектора, а також довгострокове зберігання електроенергії. Водночас у Держенергоефективності вказали на кроки, які необхідно виконати у рамках Стратегії розвитку водневої енергетики України до 2050 року:

- розробка законодавства та стандартів виробництва, транспортування, зберігання та використання водню;
- розробка стимулів;
- реалізація пілотного проекту із виробництва «зеленого» водню;
- розвиток інфраструктури транспортування водню [8].

Вартість водню

Щодня публікуються ціни на водень, які зазвичай наводяться в дол./кг і євро/кг водню, відображають отримання водню двома основними виробничими способами: переважним паровим риформінгом метану і протон-обмінним мембранним електролізом (PEM/ Proton Exchange Membrane).

Цінові прогнози щодо вартості водню для споживачів такі: ціна водню у кінцевого споживача з доставкою (тобто є ціна CIF, куди входить вартість виробництва, зберігання та транспортування) залежно від тієї чи іншої національної програми з водневої енергетики очікується в межах 3...6 \$/кг. Так, у Японії 2025 р. Ціна водню має становити 3 \$/кг, США – 5 \$/кг, у країнах ЄС – 6 \$/кг. Як зазначалося вище, у період 2035-2040 рр., згідно з прогнозами DOE [9,10], ціна водню повинна знизитися до рівня 2,5 \$/кг за його мало- та середньотонажного розподіленого виробництва.

Вартість водню з розвитком ринку істотно знижується. Як правило, орієнтиром і бар'єром для зниження ціни високочистого водню є вартість електрики, яка споживається для генерації кожного кілограма газоподібного водню, що перевищує 35 кВт.год.

Відомий факт, що вартість водню, отриманого парової конверсією, поки що приблизно втричі перевищує вартість природного газу на одиницю отриманої енергії. Незважаючи на те, що багато експертів скептично ставляться до того, що отриманий з відновлюваних джерел водень колись стане доступним за низькою ціною [11], водень, що отримується за рахунок енергії вітру в Німеччині та шт. Техасі (США) вже зараз конкурентоспроможний за вартістю при організації його мало- і середньомасштабного виробництва. Техніко-економічні розрахунки показали, що економічно вигідно виробля-

ти водень за ціною 3,25 \$/кг у Німеччині та за ціною 3,53 \$/кг у Техасі, при цьому краще налагоджувати виробництво водню не в Німеччині, а у Великобританії, оскільки тут природні умови характеризуються великою кількістю вітрів.

Що стосується цін на товарний водень на кожному з діючих водневих хабів, то вони враховують багато факторів, включаючи вартість вихідного природного газу та електрики, різні технологічні вимоги (допускається наявність парників газів чи ні), оцінки різних варіантів вартості (чи враховуються лише експлуатаційні витрати ГОРІХ або додаються ще й капітальні витрати CAPEX) і багато іншого [12].

Американське інформаційне агентство Platts (S&P Global Platts), яке займається різними ціновими котируваннями, публікує, зокрема, й ринкові ціни на водень у різних регіонах світу, а також ціни на спеціалізованих регіональних хабах. Крім того, у разі необхідності Platts може корелювати ціну на водень з цінами таких молекул-носіїв водню для його зберігання та транспортування, як наприклад аміак та ін. (9% H₂) без використання процесу CCS склала 0,7955 \$/кг [11].

Згідно з даними компанії Research & Markets, вартість водневих паливних елементів для автомобілів, що у 2000 р. становила 275 \$/кВт потужності, у 2005 р. впала більш ніж у 2 рази (до 110 \$/кВт) [13], а завдяки вдосконаленню та модернізації технологій виробництва, ті системи на основі водневих паливних елементів, які у 2005 р. продавали по \$60 тис., тепер коштують близько \$10 тис.

Висновки

У зв'язку з перспективою, що намітилася, переходу до низьковуглецевої енергетики в XXI столітті прогнозується різке збільшення попиту на водень, так як багато галузей перейдуть на нові способи виробництва високоякісної продукції з використанням водню, будуть потрібні екологічно чистий транспорт та системи розподіленого енергозбереження, що працюють на водневих паливних елементах. Ключове завдання молодій водневій енергетики: з метою декарбонізації світової енергетичної системи, що намітилася, розгорнути ефективне виробництво водню в промислових масштабах. У разі організації великого конкурентоспроможного вітчизняного виробництва водню для нашої країни відкриються можливості виходу на світовий ринок водню та супутніх продуктів із високою додатковою вартістю.

Незважаючи на те, що становлення та розвиток світового ринку водню пов'язане із серйозними труднощами (вартість виробництва, зберігання та транс-

портування, специфіка інфраструктури водню), останні наукові та прикладні дослідження та розробки показали, що у вирішенні цих питань спостерігається явний прогрес, який може забезпечити широке використання водню як екологічно чистого джерела енергії та сировини для отримання широко затребуваних хімічних та нафтохімічних продуктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Staffell I., Skamman D., Abad A., Balcombe P., Dodds P., Ekins P., Ward K. Energy Environ. Sci. 2019. V.12. P. 463. DOI: 10.1039/c8ee01157e
2. *Hydrogen scaling up*. A sustainable pathway for the global energy transition/ Hydrogen Council. November 2017/ URL: <https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.
3. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. Июнь 2019.
URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Rus.pdf
4. *EU EDGAR Database* (Joint Research centre (European Commission), 2018. Fossil CO2 emissions of all world countries, 2018 report. URL: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2018>
5. *Водородная энергетика: инновационный проект XXI века*. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/71/4879.htm>
6. Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика: разрушит ли новое топливо «ископаемую» цивилизацию. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/358673-vodorodnaya-ekonomika-razrushit-li-novoe-toplivo-iskopaemuyu-civilizaciyu>
7. *Visn.Nac.Acad.Nauk Ukr.* 2019. (4) ISSN 1027-3239.
8. <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2021/03/29/672415/>
9. Randolph K. U.S. DOE. Hydrogen production – Session introduction, 2013 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, May 16, 2013. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/re-view13/pd000_randolph_2013_o.
10. U.S. Department of Energy (DOE). URL: <https://www.hydrogen.energy.gov/index.html>.
11. Jocelyn Timperley. Renewable hydrogen “already cost competitive”, says new research. March 15, 2019. URL: <https://energypost.eu/renewable-hydrogen-already-cost-competitive-saya-new-research/>
12. *The cost of hydrogen*: Platts launches Hydrogen Price Assessment. By Trevor Brown on December 19, 2019. AMMONIA Energy Association.
URL: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-hydrogen-platts-launches-hydrogen-price-assessment/>
13. *Hydrogen Energy Storage Markets 2019 – Global Forecast to 2024*. Oct 22, 2019. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/hydrogen-energy-storage-markets-2019-global-forecast-to-2024-300942023.htm>

TODAY'S REALITIES AND PROSPECTS OF THE FUTURE DEVELOPMENT OF HYDRO ENERGY IN THE WORLD AND IN UKRAINE

Obodovych O.M.¹, Pereiaslavl'tseva O.O.², Tselen B.Y.³, Rezakova T.A.⁴

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

¹Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department, *orcid.org/0000-0001-7213-3118*, e-mail: *tdsittf@ukr.net*

²PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: *alena_p11@ukr.net*, *https://orcid.org/0009-0001-2646-8600*

³PhD (Engin.), *orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-5213-0219*, e-mail: *b0d@ukr.net*

⁴PhD (Engin.), e-mail: *tdsittf@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.6>

Traditional fossil fuels have a detrimental effect on the global environmental situation, which leads to stricter standards for environmental protection. Therefore, in recent years there has been a need to develop and master new technologies that make it possible to generate, store and transmit energy without or while minimizing emissions of greenhouse gases into the atmosphere, primarily CO₂, which is referred to as the so-called “carbon footprint”.

An emerging branch of global energy - hydrogen energy- is based on the use of a compound such as hydrogen as a means for accumulating, transporting, producing and consuming energy.

Hydrogen is expected to transform the economy in four main application areas: transportation, industry, energy and utilities.

The purpose of this review is to analyze the main trends and criteria for the successful development of global hydrogen energy, as well as to consider the state and prospects for the development of the emerging global and Ukrainian hydrogen energy markets.

The article analyzes the development of the hydrogen energy market, discusses national programs to support this new branch of world energy and pilot hydrogen projects. Issues of production, consumption, accumulation, storage and transportation of hydrogen are considered.

Ukraine is one of the EU's priority partners in the future hydrogen economy, as it has the necessary capacity for hydrogen production - both for domestic consumption and for export. In 2021, the Ministry of Energy of Ukraine joined the European Pure Hydrogen Alliance. Ukraine's potential for hydrogen production is currently being investigated. The possibility of using the national GTS for hydrogen transportation to Europe is also being studied.

The results of the targeted comprehensive program of scientific research of the National Academy of Sciences of Ukraine regarding the creation of new materials, technological processes, structures and systems that could become the basis for the widespread introduction of hydrogen technologies in Ukraine are presented. An assessment of the state of the global and Ukrainian hydrogen markets and the prospects for their development in the coming years is provided.

References 13, tables 4.

Keywords: hydrogen, hydrogen energy, decarbonization, hydrogen infrastructure, hydrogen market, market development forecast.

1. Staffell I., Skamman D., Abad A., Balcombe P., Dodds P., Ekins P., Ward K. Energy Environ. Sci. 2019. V.12. P. 463. DOI: 10.1039/c8ee01157e

2. *Hydrogen scaling up*. A sustainable pathway for the global energy transition/ Hydrogen Council. November 2017/ URL: <https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.

3. Mitrova T., Mel'nikov YU., Chugunov D. Vodorodnaya ekonomika – put' k nizkouglerodnomu razvitiyu. Tsentr energetiki Moskovskoy shkoly upravleniya SKOLKOVO. Iyun' 2019.

URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydroren-economy_Rus.pdf

4. *EU EDGAR Database* (Joint Research centre (European Commission), 2018. Fossil CO₂ emissions of all world countries, 2018 report. URL: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2018>

5. *Vodorodnaya energetika: innovatsionnyy proyekt KHKHÍ veka*. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/71/4879.htm>

6. Mel'nikov YU., Chugunov D. Vodorodnaya ekonomika: razrushit li novoye toplivo «iskopayemuyu» tsivilizatsiyu. <https://www.forbes.ru/biznes/358673-vodorodnaya-ekonomika-razrushit-li-novoe-toplivo-iskopaemuyu-civilizatsiyu>

7. *Visn.Nac.Acad.Nauk Ukr.* 2019. (4) ISSN 1027-3239.
8. <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2021/03/29/672415/>
9. *Randolph K.* U.S. DOE. Hydrogen production – Session introduction, 2013 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, May 16, 2013. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/re-wiew13/pd000_randolph_2013_o.
10. *U.S. Department of Energy (DOE).* URL: <https://www.hydrogen.energy.gov/index.html>.
11. *Jocelyn Timperley.* Renewable hydrogen “already cost competitive”, says new research. March 15, 2019. URL: <https://energypost.eu/renewable-hydrogen-already-cost-competitive-saya-new-research/>
12. *The cost of hydrogen: Platts launches Hydrogen Price Assessment.* By Trevor Brown on December 19, 2019. AMMONIA Energy Association.
URL: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-hydrogen-platts-launches-hydrogen-price-assessment/>
13. *Hydrogen Energy Storage Markets 2019 – Global Forecast to 2024.* Oct 22, 2019. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/hydrogen-energy-storage-markets-2019-global-forecast-to-2024-300942023.htm>

Отримано 31.01.2024

Received 31.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024

Accepted for publication 11.04.2024

УДК 697.13

СТРАТЕГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДІВЕЛЬ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВОЇ АГРЕСІЇ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Басок Б.І.¹, чл.-кор. НАН України, Беспала Н.Г.²

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹докт. техн. наук, професор, зав. відділу, ORCID 0000-0002-1068-9935

²аспірантка, ORCID 0000-0002-4466-6491

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.7>

У даній статті проведено аналіз найчастіших заходів, на які подають заявки для відновлення багатоквартирних будівель внаслідок військової агресії. Шляхом аналізу поданих заявок було виявлено, що серед них найпоширенішими є заходи заміни вікон і утеплення фасадів. Виявлено, що ці заходи є популярними через їхню ефективність у покращенні енергоефективності, забезпеченні комфорту для мешканців та підвищенні безпеки будівлі. Додатковими перевагами є підтримка програмами фінансування та грантами, що робить їх більш доступними для об'єднань співвласників багатоквартирних будинків. Висновки цього дослідження можуть бути корисними для спеціалістів у галузі будівництва та громадських організацій, які займаються відновленням внаслідок дій військової агресії.

This article analyzes the most frequent measures for which applications are submitted for the restoration of multi-apartment buildings as a result of military aggression. By analyzing the submitted applications, it was found that among them, the most common are the measures of replacing windows and insulating facades. These measures have been found to be popular due to their effectiveness in improving energy efficiency, providing occupant comfort and increasing building safety. Additional benefits include the support of financing programs and grants, making them more accessible to condominium associations. The findings of this study may be useful for construction professionals and civil society organizations involved in recovery after acts of military aggression.

Бібл. 20, рис.7.

Ключові слова: Відновлення, багатоквартирні будівлі, військова агресія, заміна вікон, утеплення фасадів, енергоефективність.

Вступ. Військова агресія залишає свій відбиток не лише на людях та територіях, але і на будівлях та житловому фонді. У багатоквартирних будівлях, які потрапили під вплив воєнних конфліктів, необхідне відновлення стає не лише актуальним, але й критично важливим для забезпечення безпеки та комфорту мешканців. У цій статті проводиться аналіз найчастіших заходів відновлення після військової агресії у багатоквартирних будівлях. Зокрема, розглядається стратегія заміни вікон та утеплення фасадів, враховуючи їхню ефективність, фінансові аспекти та переваги для мешканців та співвласників.

Руйнівні наслідки військової агресії часто призводять до серйозних пошкоджень в будівлях, зокрема у багатоквартирних житлових комплексах. Пошкодження вікон, утримання фасадів та інфраструктури не лише підірвують безпеку будівлі, але і створюють умови для зниження комфорту проживання та збільшення витрат на енергопостачання. Тому процес відновлення вирішально важливий для стабілізації житлового фонду та поліпшення якості життя населення.

Україна, після років військового конфлікту та агресії, стикається з великими викликами відновлення пошкоджених міст та інфраструктури. Одним із ключових аспектів відновлення є відновлення житла та інших будівельних об'єктів, зокрема об'єднаних співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ). У цьому контексті важливо провести аналіз ефективності впровадження заходів з відновлення, зокрема з урахуванням використання допомоги від держави та інших донорів.

Однією з головних проблем, які виникають під час реконструкції та відновлення пошкоджених будівель, є нестача фінансування. У цьому контексті допомога від держави та інших донорів стає критично важливою для успішного відновлення. Проте, ефективність використання цих коштів також потребує уваги.

Перевірка використання коштів та контроль за витратами є важливими аспектами реконструкції. Якість виконаних робіт та використаних матеріалів також має велике значення, оскільки недоліки можуть призвести до швидкого пошкодження будівлі. Крім того, важливо враховувати соціальний аспект відновлення, забезпечуючи участь мешканців у процесі планування та виконання робіт.

Впровадження заходів з відновлення в будівлях ОСББ після військової агресії є складним процесом, який потребує уважного аналізу та ефективного використання ресурсів. Програма Фонду енергоефективності надає фінансову підтримку та інструменти для здійснення енергоефективних ремонтів та модернізації, сприяючи відновленню житлових будівель після конфлікту.

Однією з ключових особливостей цієї програми є можливість отримання повної відшкодування витрат на відновлення. Це означає, що учасники ОСББ можуть отримати 100% відшкодування витрат, пов'язаних з ремонтом та модернізацією своїх будівель. Такий підхід значно полегшує фінансове навантаження на мешканців та сприяє швидкому та ефективному відновленню житлових приміщень.

У програмі "ВідновиДім" Фонд енергоефективності компенсує ряд заходів, спрямованих на покращення енергоефективності та комфорту житлових будівель. Деякі з цих заходів включають:

1. Утеплення фасадів: Фонд може компенсувати витрати на утеплення зовнішніх стін будівлі за допомогою сучасних теплоізоляційних матеріалів. Це дозволяє зменшити втрати тепла та знизити витрати на опалення.
2. Заміна вікон: Програма може покривати витрати на заміну застарілих вікон на енергоефективні моделі з подвійним склопакетом та теплоізоляційними властивостями. Це допомагає покращити теплоізоляцію будівлі та знизити витрати на опалення та кондиціювання.
3. Модернізація систем опалення: Фонд може фінансувати заміну застарілих опалювальних систем на

більш ефективні та екологічно чисті альтернативи, такі як конденсаційні котли або системи теплових насосів. Це дозволяє знизити споживання енергії та викиди CO₂.

4. Утеплення даху: Програма може також компенсувати витрати на утеплення даху будівлі, що дозволяє знизити втрати тепла та покращити комфорт у приміщенні.

5. Інші енергоефективні заходи: (такі як відновлення водовідведення, встановлення лічильників, тощо.) Фонд може фінансувати інші заходи, спрямовані на зменшення споживання енергії та покращення енергоефективності будівлі, такі як установка енергоефективного освітлення, встановлення систем вентиляції з рекуперацією тепла тощо.

Загалом, програма "ВідновиДім" Фонду енергоефективності спрямована на покращення якості життя мешканців та зниження енерговитрат у житлових будівлях шляхом компенсації витрат на енергоефективні заходи. [1-4].

Основні фактори, котрі впливають на споживання енергоресурсів будівлями наведені на рис 1[1].

Одним з таких факторів є вплив коефіцієнта опору теплопередачі на споживання енергії. Порівняння впливу коефіцієнта опору теплопередачі вікна/дверей на споживання енергії для опалення приміщень є важливим аспектом при розробці програм відновлення будівель. Це обумовлено тим, що ефективні вікна та двері можуть значно зменшити втрати тепла, що відбуваються через них, і відповідно знизити енергоспоживання для опалення приміщень. Застосування вікон та дверей з висо-



Рис. 1. Фактори, котрі впливають на споживання енергоресурсів будівлями [1]

ким коефіцієнтом опору теплопередачі може допомогти ефективно утримувати тепло у приміщенні, зменшуючи залежність від систем опалення та витрати на них. (див. рис. 2)

За результатами аналізу заявок, поданих до Фонду енергоефективності, стало очевидним, що найбільш популярними серед запитів на відновлення є заходи, пов'язані з ремонтом або заміною пошкоджених світлопрозорих огорожувальних конструкцій. Це свідчить про те, що власники будівель вважають ремонт або заміну вікон та інших світлопрозорих елементів пріоритетними для покращення якості та енергоефективності житла. Такий попит відображає свідомість громади щодо важливості оптимізації енер-

госпоживання та підтримки сталого житла. Ці заходи є ключовими для зменшення втрат тепла, покращення ізоляції та забезпечення оптимальних умов в приміщенні, що в результаті призводить до зниження енерговитрат та підвищення комфорту для мешканців. [1-5].

Крім того, відновлення світлопрозорих огорожувальних конструкцій сприяє покращенню естетичного вигляду будівлі та збільшенню природного освітлення у приміщеннях, що позитивно впливає на настрій та здоров'я мешканців. Ці заходи також сприяють зменшенню шуму та пилу, що може проникати через старі або пошкоджені вікна, що створює комфортніші умови для проживання.

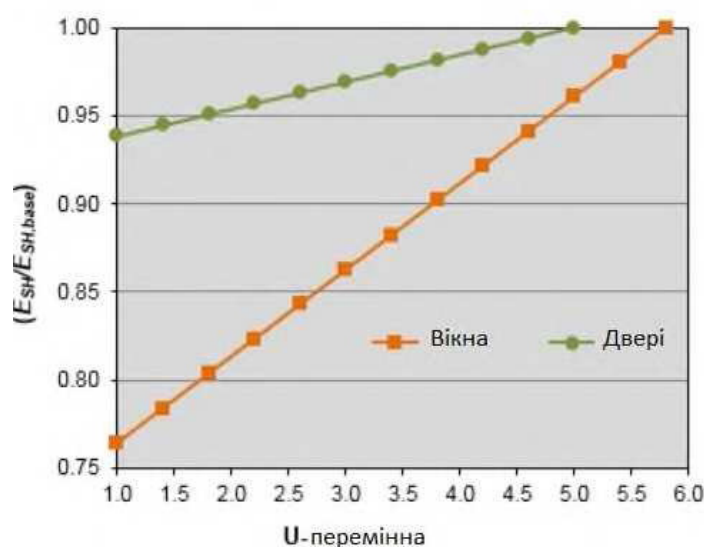


Рис. 2. Порівняння впливу коефіцієнта опору теплопередачі вікна/дверей на споживання енергії для опалення приміщень [1]

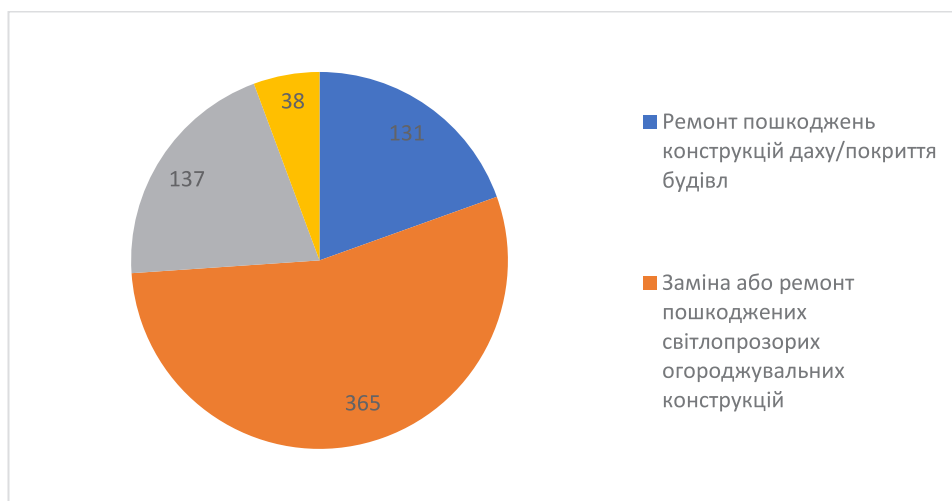


Рис. 3. Найпоширеніші заходи відновлення в багатоквартирних будівлях

З цього аналізу можна зробити висновок, що ініціатива Фонду енергоефективності є важливим і потрібним кроком у напрямку підвищення енергоефективності та комфорту житла, а також сприяє покращенню якості життя мешканців. Ця програма не лише забезпечує фінансову підтримку для проведення відновлювальних робіт, але й стимулює свідоме використання ресурсів та підтримує стале споживання енергії, що є важливим аспектом для сталого розвитку суспільства.

Це можна обґрунтувати тим, що внаслідок вибухової хвилі виникають серйозні пошкодження, серед яких особливо варто виділити руйнування склопакетів, металочерепиці та оздоблення фасаду. Ці пошкодження виникають через дію великого тиску та сили, що супроводжує вибух. Нижче подано детальний опис пошкоджень:

- Склопакети: Склопакети, які є необхідною складовою частиною вікон та фасадів будівель, піддаються великому тиску та силі вибухової хвилі. Це може призвести до розбиття скла та руйнування рамок вікон, що породжує значні пошкодження та підвищує ризик травм для мешканців. (див. рис. 3).

- Покрівля: Металочерепиця, що використовується для покриття дахів, також піддається серйозним пошкодженням внаслідок вибуху. Сила вибухової хвилі може призвести до зірвання або згортання листів металу, що призводить до руйнування даху та потенційної небезпеки для життя та здоров'я мешканців.

- Оздоблення фасаду: Матеріали, що використовуються для оздоблення фасаду, наприклад штукатурка чи камінь, також можуть зазнати серйозних пошкоджень внаслідок вибуху. Велика сила тиску може відштовхнути або розірвати ці матеріали, що призводить до значних пошкоджень та потреби у серйозному відновленні для забезпечення безпеки та стійкості будівлі. (див. рис. 4). [4-6].

Отже, внаслідок вибухової хвилі руйнуються склопакети, металочерепиця та оздоблення фасаду через дію великого тиску та сили, що виникають під час вибуху. Ці пошкодження можуть бути значними та потребувати серйозного відновлення для забезпечення безпеки та стійкості будівлі.

Проведений аналіз поданих заявок вказує на те, що найбільшу кількість запитів на відновлення подали ОСББ з Київської області, а також з Миколаївської області. Це пояснюється різними факторами, включаючи рівень розвиненості ОСББ в цих регіонах та підвищений ризик фінансування.

У Київській області, можна спостерігати велику кількість багатоквартирних будинків, які управляються ОСББ. Це може пояснюватися більш високим ступенем організаційної активності мешканців та більшим рівнем свідомості щодо можливостей фінансування відновлення.

У Миколаївській області та інших регіонах можливо спостерігати підвищений ризик фінансування через різні причини. Деякі з них включають обмежені

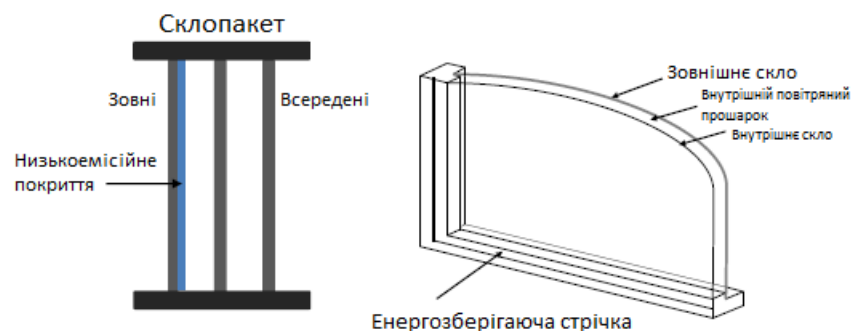


Рис. 4. Структура енергозберігаючих склопакетів



Рис. 5. Структура утеплення фасадів будівлі

бюджетні ресурси на рівні місцевих влад, відсутність належної підтримки та інфраструктури для реалізації програм відновлення, а також складність у взаємодії з установами чи організаціями, які забезпечують фінансування. [4-8]

У зв'язку з цим, ОСББ в цих регіонах зазнають складнощів у реалізації відновлювальних заходів, що призводить до підвищеного обсягу запитів на фінансову підтримку від Фонду енергоефективності. (див. рис.5).

Моделювання відновлення багатоквартирних будівель після військової агресії є надзвичайно важливим через декілька ключових причин. По-перше, кліматичні умови визначають енергетичні потреби будівлі і можливості використання альтернативних джерел енергії. Друге, економічні показники, такі як вартість матеріалів та робочої сили, впливають на планування та

реалізацію проектів відновлення. Третє, розуміння енергетичних потреб дозволяє створити ефективну енергетичну систему відновленої будівлі, що зменшує витрати та екологічний вплив. Здійснення системного аналізу навантажень на існуючу енергетичну мережу допомагає уникнути перевантаження та забезпечити стабільну роботу системи. Усі ці аспекти допомагають забезпечити ефективне та стійке відновлення будівлі, що є важливим для комфорту та енергоефективності мешканців. Відповідно, моделювання відновлення є ключовим компонентом розробки стратегій, оскільки дозволяє точно оцінити енергетичні потреби будівлі та зменшити споживання енергії. Такий аналіз також допомагає врахувати всі фактори, що впливають на енергетичну ефективність, і забезпечити оптимальне використання ресурсів. (див. рис. 6).

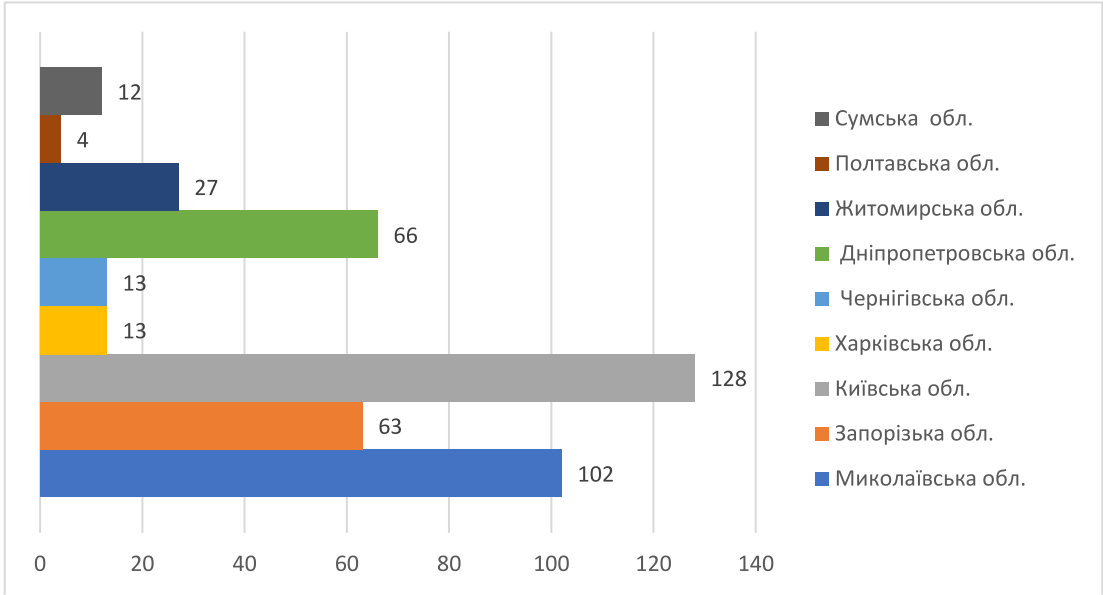


Рис. 6. Кількість запитів на відновлення будівель по регіонах України

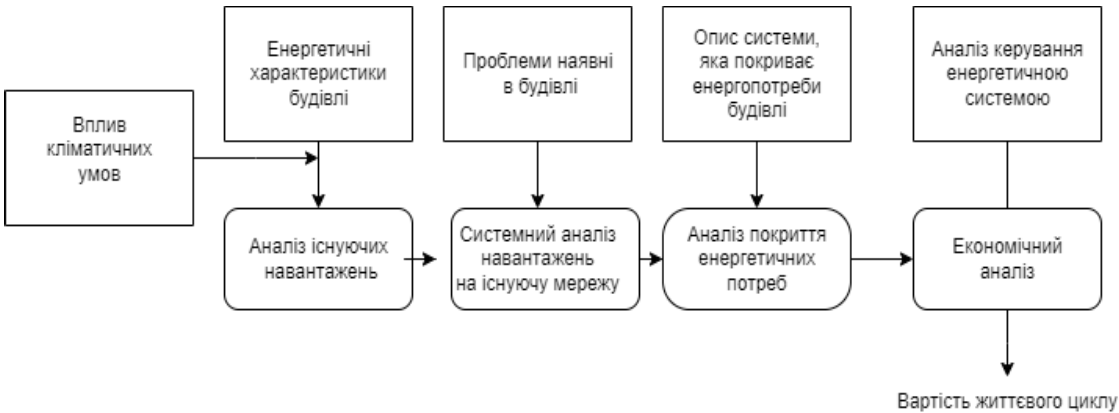


Рис. 7. Методологія відновлення багатоквартирних будівель

Оцінка енергетичних характеристик будівлі є ключовою для проведення її енергетичного моделювання та розроблення оптимальних стратегій відновлення. Цей процес дозволяє виявити проблемні зони та знайти шляхи їх вирішення. Енергетичне моделювання, використовуючи спеціалізовані програми, допомагає визначити ефективні заходи з енергозбереження та встановити оптимальні стратегії відновлення, зменшуючи споживання енергії та покращуючи комфорт для мешканців. Такий аналіз включає оцінку тепловтрат, систем опалення та кондиціонування, теплоізоляції, а також використання енергоефективного обладнання. Здійснення системного аналізу допомагає розробити ефективні та стійкі стратегії відновлення, сприяючи зменшенню витрат на енергію та досягненню цілей сталого розвитку.

Однією із таких характеристик є форма будівлі, що визначається за допомогою таких параметрів, як фактор форми (SF), фактор компактності (CF) та відносна компактність (RC). Ці параметри дозволяють оцінити вплив форми будівлі на її енергоспоживання. Наприклад, підвищення фактора форми може призвести до збільшення тепловтрат будівлі в умовах екстремальних кліматичних умов.

$$SF = \frac{A_e}{A_c};$$

де A_e - це площа поверхні будівлі (m^2), а A_c - умовна площа підлоги (m^2).

Фактор компактності визначається як відношення площі поверхні будівлі до об'єму умовного простору:

$$CF = \frac{A_e}{V_c};$$

де V_c - об'єм умовного простору (m^3).

Відносна компактність оцінює вплив форми і геометричних розмірів на енергоефективність будівлі:

$$RC = \frac{(V_c/A_e)_{building}}{(V_c/A_e)_{Ref}};$$

де $(V_c/A_e)_{building}$ - показує компактність конкретної форми, а $(V_c/A_e)_{Ref}$ - компактність оригінальної будівлі. [7-13].

Оптимізація форми будівлі широко вивчалася в попередніх дослідженнях. Різноманітні типи будівельних форм, такі як прямокутні, L-подібні, T-подібні, кубічні

тощо, були аналізовані як теоретично, так і чисельно. Встановлено, що форма будівлі має значний вплив на енергоспоживання будівлі в екстремальних кліматичних умовах, але менший вплив - у неекстремальних зонах. Отже, розуміння та оцінка всіх аспектів характеристик будівель, включаючи їх форму, є важливою складовою у процесі моделювання та відновлення будівель [10,14].

Зважаючи на важливий фактор енергоефективності будівель під час їх відновлення внаслідок військової агресії, можна розробити наступну стратегію (див. рис.7):

1. Аналіз енергоефективності: Провести детальний аналіз енергоефективних параметрів будівель, зокрема ізоляції, опалення, вентиляції та освітлення, з метою виявлення можливостей для поліпшення енергоефективності.

2. Розробка енергоефективних рішень: Розробити план відновлення, що передбачає впровадження енергоефективних рішень, таких як утеплення стін, заміна вікон на енергоефективні моделі, встановлення енергоефективного обладнання для опалення та вентиляції тощо.

3. Фінансова підтримка: Забезпечити фінансову підтримку для реалізації енергоефективних проєктів шляхом надання субсидій, грантів або доступу до низькопроцентних кредитів.

4. Підвищення свідомості: Провести інформаційну кампанію серед мешканців та ОСББ про важливість енергоефективних заходів, їх переваги та доступність програм фінансування.

5. Підтримка ОСББ: Надати підтримку та консультації ОСББ у плануванні та реалізації енергоефективних проєктів, включаючи допомогу у розробці проєктної документації та виборі підрядників.

6. Моніторинг та оцінка: Здійснювати систематичний моніторинг та оцінку енергоефективних заходів з метою визначення їх ефективності та вдосконалення стратегій відновлення.

Ця стратегія відновлення багатоквартирних будівель внаслідок військової агресії є частиною проєкту, реалізованого Фондом енергоефективності. Проєкт спрямований на підтримку ОСББ та мешканців у відновленні пошкоджених будівель з урахуванням енергоефективних аспектів. Він передбачає надання фінансової підтримки, консультацій та інформаційної підтримки для реалізації енергоефективних заходів у будівництві та реконструкції. Цей проєкт сприяє створенню стабільних та енергоефективних житлових умов для мешканців постраждалих районів, що сприяє їхньому благополуччю та сталому розвитку. (див. рис. 4). [15-18, 20].

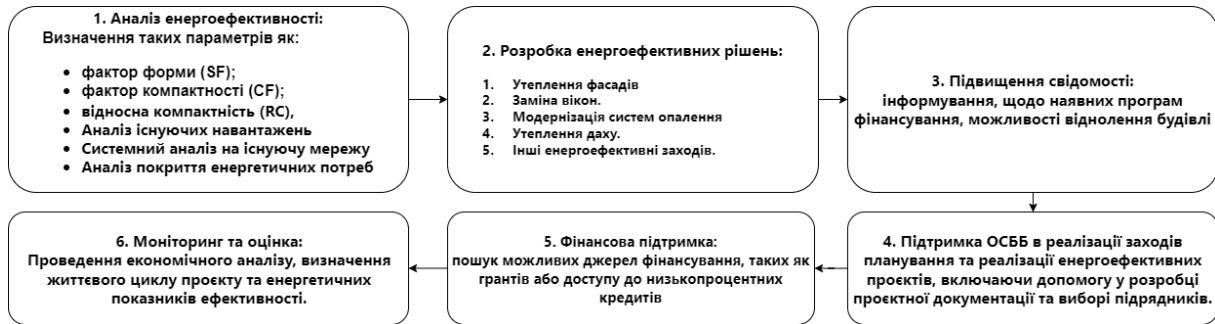


Рис. 8. Схема стратегії відновлення багатоквартирних будівель

Відновлення багатоквартирних будівель після військової агресії є важливим кроком у сталому розвитку країни, оскільки це сприяє створенню ефективних та енергоефективних будівель, що відповідають сучасним екологічним стандартам. Заміна вікон та утеплення фасадів є важливими елементами цього процесу, оскільки вони допомагають зменшити споживання енергії та зберегти ресурси. Такі заходи сприяють сталому розвитку країни, забезпечуючи збалансований розвиток економіки та збереження природних ресурсів. [15,19].

Щоб забезпечити ефективне відновлення будівель після військової агресії, важливо використовувати моделювання та методології, які дозволяють аналізувати та прогнозувати різні аспекти процесу відновлення. Моделювання може допомогти оцінити вплив різних заходів відновлення на енергоефективність, екологічність та економічну доцільність будівель.

Методологія відновлення будівель після військової агресії повинна враховувати різноманітні аспекти, включаючи кліматичні умови регіону, економічні показники, потреби в енергії та навантаження на існуючу енергетичну мережу. Важливо враховувати всі ці фактори при розробці стратегій відновлення, щоб забезпечити стале та ефективне відновлення будівель.

Моделювання дозволяє прогнозувати результати різних варіантів відновлення та визначити оптимальний підхід до відновлення будівель, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та максимізацію ефективності процесу відновлення. Такий підхід дозволяє забезпечити стале та ефективне відновлення будівель, що відповідає потребам сучасного суспільства та сприяє сталому розвитку країни.

Висновки.

Відновлення багатоквартирних будівель після військової агресії є важливим етапом у відновленні життєвих умов та соціально-економічного потенціалу

території. На основі проведеного аналізу всіх енергетичних характеристик будівлі та розроблення оптимальних стратегій відновлення, можна зробити кілька важливих висновків.

Перш за все, виявлено, що енергетичне моделювання є необхідною складовою процесу відновлення будівель після військової агресії, оскільки воно дозволяє ідентифікувати ключові аспекти, що впливають на ефективність роботи будівлі та розробляти ефективні заходи з енергозбереження.

Другим важливим висновком є необхідність врахування кліматичних умов, економічних показників та всіх енергетичних характеристик будівлі під час розроблення стратегій відновлення. Це допомагає забезпечити максимальну ефективність та стійкість будівлі в умовах відновлення.

Крім того, виявлено, що важливо проводити системний аналіз навантажень на існуючу енергетичну мережу та враховувати всі можливі енергетичні характеристики будівлі для забезпечення оптимального рівня енергоефективності та зниження витрат на енергопостачання.

Отже, висновки зазначають на необхідність комплексного підходу до відновлення будівель після військової агресії, що включає в себе енергетичне моделювання, визначення оптимальних стратегій та розроблення дійових заходів з енергозбереження. Тільки такий підхід може забезпечити ефективне відновлення та збереження ресурсів для майбутніх поколінь.

Запропонована стратегія базується на інтеграції енергетичного моделювання та системного аналізу енергетичних характеристик будівлі. Це надає можливість точно визначити оптимальні стратегії відновлення та розробити дієві заходи з енергозбереження.

Робота виконана за сприяння Національного фонду досліджень України. в рамках виконання проекту № 92/0172 «Аеродинаміка, теплообмін та інновації для

підвищення енергоефективності віконних конструкцій і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України» конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

ЛІТЕРАТУРА:

1. "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings" Автори: Shuo Chen, Guomin Zhang, Xiaobo Xia, Sujeeva Setunge, Long Shi Видавництво: Civil and Infrastructure Engineering Discipline, School of Engineering, RMIT University, Melbourne
2. "Interactive investigation of building energy performance" Автори: Francois Simon (University of Granada), Prof. Aymeric Girard (University Adolfo Ibañez) URL: <https://www.renewableinstitute.org/energy-efficiency-in-homes/>
3. Фонд енергоефективності (2020). "Програма Відновидім: стратегії та реалізація". Офіційний веб-сайт Фонду енергоефективності. URL: <https://eefund.org.ua/recovery/>
4. Джордж Ламбру, Пол Хоршем, Лідія Карузіс та ін. (2014). "Енергоефективність і екологічність будівельного сектору: досвід реалізації Європейського Союзу." Енергетика та комунальне господарство, 4 (37), 74-81.
5. Александр Давыденко, Иван Петров (2019). "Стратегії енергоефективного відновлення багатоквартирних будівель." Будівельний журнал, 2 (55), 22-29.
6. Євгеній Воронін, Ольга Сіденко (2020). "Програми підтримки енергоефективного будівництва в Україні: аналіз і перспективи." Економіка та управління, 3 (18), 45-52.
7. Наталія Мельник, Олена Литвиненко (2021). "Фінансова підтримка відновлення багатоквартирних будівель в Україні." Енергетика та екологія, 2 (43), 112-120.
8. Володимир Іванов, Марина Коваленко (2022). "Правові аспекти відновлення житлового фонду після військової агресії." Юридичний журнал, 1 (10), 88-95.
9. P. Bohdanowicz, I. Martinac, Determinants and benchmarking of resource consumption in hotels—Case study of Hilton International and Scandic in Europe, Energy Build. 39 (2007) 82–95 .
10. E. Fuentes, L. Arce, J. Salom, A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis, Renew. Sustain. Energy Rev. 81 (2018) 1530–1547.
11. G.Y. Yun , H.J. Kong , H. Kim , J.T. Kim , A field survey of visual comfort and lighting energy consumption in open plan offices, Energy Build. 46 (2012) 146–151 .
12. Lighting of Indoor Work Places, British Standards Institution, UK, 2002 .
13. J. Langevin, J. Wen, P.L. Gurian, Quantifying the human-building interaction: considering the active, adaptive occupant in building performance simulation, Energy Build. 117 (2016) 372–386 .
14. J. Ahn, S Cho, Anti-logic or common sense that can hinder machine's energy performance: energy and comfort control models based on artificial intelligence responding to abnormal indoor environments, Appl. Energy 204 (2017) 117–130 .
15. Hepbasli A, "Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 73-104, 2012.
16. Papathanasopoulou E, "Household consumption: associated fossil fuel demand and carbon dioxide emissions: The case of Greece between 1990 and 2006," Energy Policy, vol. 38, p. 4152–62, 2010.
17. Boyle, G., Renewable energy, Power for a sustainable future, Oxford: Oxford University Press, 1st edition, 1996.
18. ASHRAE, "ASHRAE Handbook – CHAPTER 32 Fundamentals – Energy estimating and modeling methods," 2005.
19. US Department of Energy, "Weather Data, EnergyPlus Energy Simulation Software," U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2013. [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm.
20. Hepbasli A, "Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 73-104, 2012.

STRATEGY FOR RESTORATION OF APARTMENT BUILDINGS AS A CONSEQUENCE OF MILITARY AGGRESSION, TAKING INTO ACCOUNT THE ENERGY EFFICIENCY FACTOR

B. Basok¹, N. Bepala²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine

¹*Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr Sci, (Engin.), Head of Department, ORCID 0000-0002-1068-9935*

²*postgraduate, ORCID 0000-0002-4466-6491*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.7>

This article analyses the most frequent measures applied for to restore apartment buildings as a result of military aggression. By analysing the applications submitted, it was found that the most common measures are window replacement and facade insulation. These measures were found to be popular due to their effectiveness in improving energy efficiency, providing comfort for residents and increasing building security. Additional benefits are the support of funding programmes and grants, which makes them more affordable for HOAs. The findings of this study may be useful for construction professionals and NGOs involved in the reconstruction of buildings affected by military aggression.

References 20, figures 7.

Keywords: Restoration, apartment buildings, military aggression, window replacement, facade insulation, energy efficiency.

1. "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings" Авторы: Shuo Chen, Guomin Zhang, Xiaobo Xia, Sujeeva Setunge, Long Shi. Издательство: Civil and Infrastructure Engineering Discipline, School of Engineering, RMIT University, Melbourne

2. "Interactive investigation of building energy performance" Авторы: Francois Simon (University of Granada), Prof. Aymeric Girard (University Adolfo Ibañez) URL: <https://www.renewableinstitute.org/energy-efficiency-in-homes/>

3. *Energy Efficiency Fund* (2020). "RenovateDom Program: Strategies and Implementation". Official website of the Energy Efficiency Fund. URL: <https://eefund.org.ua/recovery/>.

4. George Lambrou, Paul Horsham, Lydia Karouzis, et al. (2014). "Energy efficiency and environmental performance of the building sector: the experience of the European Union." *Energy and Utilities*, 4 (37), 74-81.

5. Oleksandr Davydenko, Ivan Petrov (2019). "Strategies for energy-efficient renovation of multi-apartment buildings." *Construction Journal*, 2 (55), 22-29.

6. Yevhen Voronin, Olga Sidenko (2020). "Programs to Support Energy Efficient Construction in Ukraine: Analysis and Prospects." *Economics and Management*, 3 (18), 45-52.

7. Natalia Melnyk, Olena Lytvynenko (2021). "Financial Support for the Renovation of Multifamily Buildings in Ukraine." *Energy and Ecology*, 2 (43), 112-120.

8. Volodymyr Ivanov, Maryna Kovalenko (2022). "Legal Aspects of Restoring the Housing Stock after Military Aggression." *Yurydychnyi zhurnal*, 1 (10), 88-95.

9. P. Bohdanowicz, I. Martinac, Determinants and benchmarking of resource consumption in hotels—Case study of Hilton International and Scandic in Europe, *Energy Build.* 39 (2007) 82–95 .

10. E. Fuentes, L. Arce, J. Salom, A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 1530–1547 .

11. G.Y. Yun , H.J. Kong , H. Kim , J.T. Kim , A field survey of visual comfort and lighting energy consumption in open plan offices, *Energy Build.* 46 (2012) 146–151 .

12. *Lighting of Indoor Work Places*, British Standards Institution, UK, 2002 .

13. J. Langevin , J. Wen , P.L. Gurian, Quantifying the human-building interaction: considering the active, adaptive occupant in building performance simulation, *Energy Build.* 117 (2016) 372–386 .

14. J. Ahn, S Cho, Anti-logic or common sense that can hinder machine's energy performance: energy and comfort control models based on artificial intelligence responding to abnormal indoor environments, *Appl. Energy* 204 (2017) 117–130 .

15. Hepbasli A, "Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 73-104, 2012.

16. Papathanasopoulou E, "Household consumption: associated fossil fuel demand and carbon dioxide emissions: The case of Greece between 1990 and 2006," *Energy Policy*, vol. 38, p. 4152–62, 2010.

17. Boyle, G., *Renewable energy, Power for a sustainable future*, Oxford: Oxford University Press, 1st edition, 1996.

18. *ASHRAE*, “ASHRAE Handbook – CHAPTER 32 Fundamentals – Energy estimating and modeling methods,” 2005.

19. *US Department of Energy*, “Weather Data, EnergyPlus Energy Simulation Software,” U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2013. [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm.

20. *Hepbasli A*, “Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 73-104, 2012.

Отримано 17.03.2024

Received 17.03.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 620.92

ПОТОЧНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОЩУВАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОСЛИН В УКРАЇНІТрибой О.В.¹, Железна Т.А.², канд. техн. наук, Драгнєв С.В.³, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹молодший науковий співробітник, tryboi@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8824-5074>²провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>³старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186><https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.8>

Розглянуто потенціал вирощування енергетичних рослин в Європі. Показано місце енергетичних рослин в поточному і перспективному потенціалі біомаси в Україні. Проаналізовано поточний стан розвитку даного сектору біоенергетики в ЄС і в Україні. Представлено техніко-економічні показники проєктів з вирощування енергетичних рослин для умов України. Запропоновано напрямки підвищення економічної привабливості відповідних проєктів.

The potential of growing energy crops in Europe is considered. The place of energy crops in Ukraine's current and prospective biomass potential is shown. The current state of development of this bioenergy sector in the EU and Ukraine is analyzed. Technical and economic indicators of projects on cultivating energy crops for Ukraine's conditions are presented. Directions to improve the economic attractiveness of respective projects are proposed.

Бібл. 13, табл. 5, рис. 3.

Ключові слова: біомаса, потенціал біомаси, біопаливо, енергетичні рослини, енергетична верба, міскантус.

АДЕ – альтернативні джерела енергії;

БАУ – Біоенергетична асоціація України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

н.е. – нафтовий еквівалент;

р.м. – робоча маса;

с.р. – суха речовина;

LHV – нижча теплота згорання;

W – вологість.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю переходу зі споживання викопних палив на відновлювані джерела енергії, зокрема біомасу, для забезпечення диверсифікації джерел енергопостачання та сталого розвитку. Додатково такий «зелений» перехід сприяє скороченню викидів парникових газів, що, в свою чергу, уповільнює процес глобального потепління. Стале вирощування енергетичних рослин дає можливість щорічно отримувати великі обсяги біомаси для потреб енергетики без створення конкуренції виробництву харчових продуктів і кормів, а також дозволяє відновлювати родючість малопродуктивних та деградованих земель.

Метою роботи є аналіз поточного стану розвитку даного сектору біоенергетики в Україні, а також розробка рекомендацій для створення сприятливих умов для реалізації проєктів із вирощування енергетичних рослин. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Загальна характеристика енергетичних рослин

Енергетичні рослини – це культури, які вирощуються з метою отримання біомаси як паливної сировини для подальшого виробництва енергії або біопалив. Їх перевагою є можливість вирощування на маргінальних або низькоякісних землях, тобто таких, що непридатні для культивування звичайних сільськогосподарських культур. Деякі енергорослини є посухостійкими (наприклад, просо прутіподібне, сорго багаторічне), інші – морозостійкими (міскантус, сильфій пронизанолистий). Одним з ключових моментів планування створення плантації є підбір культури до конкретних умов ділянки. Перевагу слід віддавати посадковому матеріалу, який пройшов випробування за місцевих умов та вдало зарекомендував себе на ринку. Іноді енергетичні рослини висаджують для фіторе mediaції забруднених земель через їх здатність накопичувати та нейтралізовувати шкідливі речовини. Наприклад, міскантус гігантський, верба прутівидна, тополя можуть поглинати важкі ме-

тали; верба, гірчиця сарапетська, очеретянка звичайна – радіонукліди; рогіз, кукурудза – пестициди.

Енергетичні рослини можна класифікувати по виду (деревні, трав'яні), циклу вирощування (однорічні, багаторічні) і типу (олійні, цукристі, крохмалевмісні, лігноцелюлозні). Прикладами деревних культур є верба, тополя, павловнія (багаторічні рослини), прикладами трав'яних – міскантус, просо прутіподібне, арундо тростинний (однорічні рослини). З олійних енергорослин (ріпак, ріжій) можна виробляти біодизель, з цукристих і крохмалевмісних (сорго цукрове, кукурудза) – біоетанол, з лігноцелюлозних (верба, тополя) – передові рідкі біопалива або навіть біометан (шляхом термохімічної газифікації біомаси).

Оптимальними для створення плантацій є ґрунти з кислотністю 5...7,5 або необхідний посадковий матеріал, толерантний до рівня рН поза цими межами. Врожай однорічних енергетичних рослин збирають кожного року, багаторічних – зазвичай один раз на 2...3 роки. Життєвий цикл плантації може тривати від 10 до 50 років в залежності від виду рослини. Річна врожайність біомаси коливається від 4...10 т с.р./га (павловнія, тополя) до 25...50 т с.р./га (арундо тростинний) (табл. 1).

Деревні та трав'яні енергетичні рослини мають хороші паливні характеристики, що є близькими до показників лісової деревини. За вмістом хлору (~0,03%) і температурою плавлення золи (~1300 °С) ці показники значно кращі, ніж у соломі (в середньому 0,5% і 950 °С, відповідно) (табл. 2). Біомаса деревних/трав'яних енергорослин заготовлюється у вигляді трісок, після чого може безпосередньо використовуватися як паливо або як сировина для виробництва гранул та брикетів. Ущільнену біомасу можна ефективно

транспортувати на довгі відстані через її високу питому енергомісткість і насипну щільність. Так, наприклад, питомий енерговміст брикетів з міскантусу становить 9...10 ГДж/м³, насипна щільність – 500...600 кг/м³, а для тріски з міскантусу ці показники складають 3,4...3,7 ГДж/м³ і 200...220 кг/м³, відповідно.

Орієнтовну залежність між потужністю котла і площею плантації верби/міскантусу, необхідною для забезпечення котла біопаливом (трісками) наведено на рис. 1. Дані відповідають наступним умовам: тривалість опалювального сезону – 178 днів, ККД котла – 85%, номінальне навантаження – 70%, врожайність верби (W50%) 2...6 зборів (1 і 7 зборів) – 20 (12) т/га/рік (збір один раз на три роки), врожайність міскантусу (W20%) 3...20 зборів (1, 2 зборів) – 20 (5, 12) т/га/рік.

Потенціал вирощування енергетичних рослин в Європі

В ЄС-27 і Об'єднаному Королівстві енергетичні рослини вирощуються на близько 118,5 тис. га, у тому числі тополя – 21,5 тис. га, верба – 24,2 тис. га, міскантус – 29,0 тис. га (дані 2021 р.). Найбільші плантації розташовані в Польщі (17,8 тис. га), Німеччині (15,8 тис. га), Великобританії (13 тис. га), Швеції (11,6 тис. га), Греції (11 тис. га). В Польщі вирощують, в основному, тополя і вербу, в Німеччині – міскантус та інші трав'яні енергорослини, у Великобританії – міскантус, у Швеції – вербу [7].

За даними різних авторів, потенційна площа сільськогосподарських земель, доступних для створення плантацій енергетичних рослин в Європі, оцінюється на сьогодні у 7...42 млн га, а до 2030 р. – у 7...52 млн га. Крім того, потенційна площа пасовищ, доступних для культивування деревних та трав'яних енерге-

Табл. 1. Характеристики вирощування енергетичних рослин [1-3]

Назва	Вимоги до ґрунту, рН	Цикл плантації, років	Періодичність збору врожаю	Врожайність біомаси, т с.р./га/рік	LHV, МДж/кг с.р.
Верба прутівидна	5..7	20...25	1 раз на 2...3 роки	7,2...10,1	16,7...18,4
Павловнія	5..7	45...50	1 раз на 3 роки	3,6...8	16,7
Тополь	6..7	20...25	1 раз на 2...3 роки	4...10	17,7...18,7
Міскантус	5,5...7,5	20...25	щорічно	16,4...28	16,8...20,4
Просо прутіподібне	5,5...7	10...15	щорічно	8,5...15	15,9...17,7
Сорго багаторічне	5...8,5	8...10	щорічно	10...17	16,5
Сильфій пронизанолістий	5,5...7,5	15...20	щорічно	11,6...21,9	14,6...17,9
Арундо тростинний	4,8...7	30...50	щорічно	25...50	16...18

Табл. 2. Елементний склад і паливні характеристики біомаси енергетичних рослин [4-6]

Показники	Міскантус	Верба	Тополя	Солома ²⁾	Тріски з лісової деревини ²⁾	Обрізки плодкових деревини ²⁾
Вологість при збиранні, %	15...23	40...53	50...55	15...20	35...55	35...40
Насипна щільність ¹⁾ , кг/м ³	200...220	220...300	220...300	50...60	240...350	150
Нижча теплота згорання, МДж/кг р.м.	10...14	8...10	8...10	13,5...15	8...12	9...12
Елементний склад, %:						
вуглець С	47,0	50,3	48,0	42...43	50	47...48
водень Н	5,6	6,0	5,9	5,0	6,0	5,0...6,7
кисень О	45,8	42,6	45,3	37...38	43	44...46
хлор Cl	0,04	0,02...0,03	0,03...0,04	0,14...0,97	0,02	0,02...0,05
азот N	0,16...1,37	0,5...1,0	0,77...0,9	0,4...0,6	0,3	0,54...0,85
сірка S	0,28	0,03...0,34	0,03...0,2	0,05...0,2	0,05	0,18...0,20
Зольність, %	2,3...3,7	1,5...2	0,5...1,9	2...4	0,5...1,5	2,0...4,8
Температура плавлення золи, °С	1250...1385	>1500	1160...1500	850...1050	1000...1400	1000...1300

1) Для міскантуса, верби і тополі вказано насипну щільність подрібненої біомаси. 2) Для порівняння.

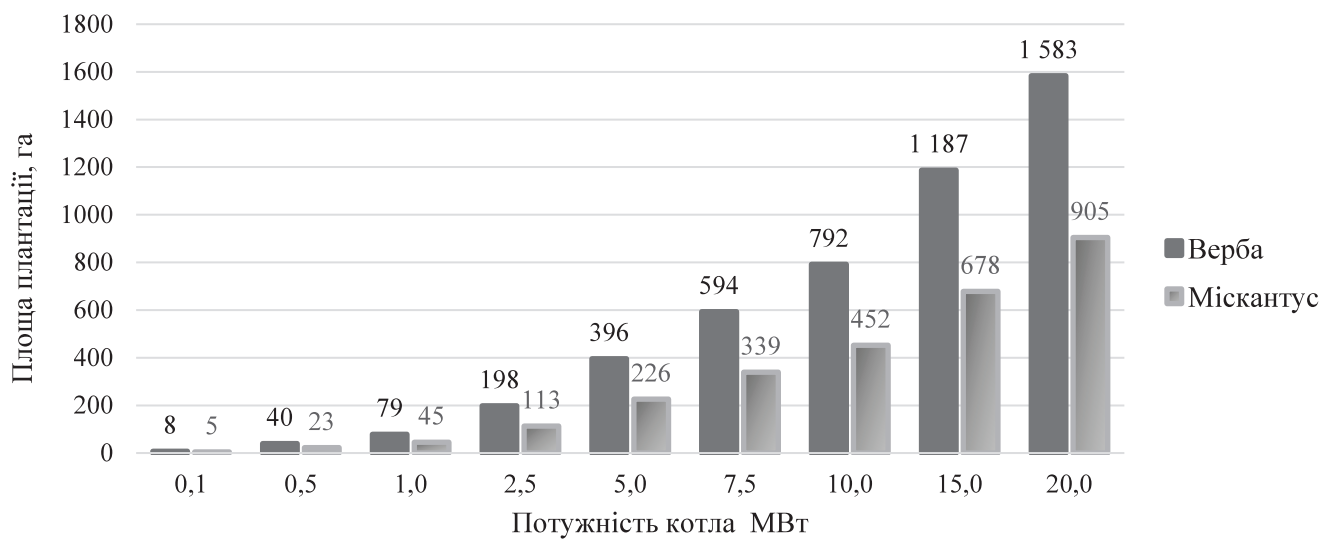


Рис. 1. Залежність між потужністю котла і необхідною площею плантації енергетичних рослин

тичних рослин, складає наразі близько 10 млн га, а до 2030 р. може збільшитися до 15...19 млн га. При оцінці потенціалу площ під плантації розглядаються вільні сільськогосподарські та низькопродуктивні землі. Нижня межа результатів відповідає застосуванню жорсткіших критеріїв сталості. Виходячи з наведених оцінок по площах вільних/низькопродуктивних земель,

поточний технічний потенціал енергетичних рослин в Європі становить 64,5...289 млн т н.е./рік, а потенціал у 2030 році – 79...377 млн т н.е./рік [8].

В Євросоюзі для енергетичних рослин разом з сільськогосподарськими залишками використовується термін агробіомаса. Європейська біоенергетична асоціація (Bioenergy Europe) оцінює потенціал

агробіомаси в ЄС-27 та Об'єднаному Королівстві у 2050 р. в діапазоні 124...444 млн т н.е./рік (рис. 2). При цьому 60...80% цього потенціалу припадає саме на енергорослини, що свідчить про їх вагомий роль у розвитку європейської біоенергетики. Загалом агробіомаса є найбільшою складовою енергетичного потенціалу біомаси Європи у 2050 р. із часткою 60...70% від загального обсягу. Збільшення площ під енергетичними рослинами є частиною стратегій країн ЄС для досягнення нульового балансу викидів парникових газів до 2050 року.

Поточний стан та потенціал вирощування енергетичних рослин в Україні

В Україні, як і в ЄС, потенціал вирощування енергетичних рослин визначається, головним чином, наявною площею вільних сільськогосподарських та малопродуктивних земель, на яких можна закласти відповідні плантації. За оцінками фахівців Інституту технічної теплофізики НАН України, поточний економічний потенціал енергорослин для отримання твердого і газоподібного біопалива в Україні становить 5,44 млн т н.е./рік (дані 2021 р.). До 2050 р. цей потенціал може більш ніж подвоїтися, сягнувши 11,20 млн т н.е./рік (табл. 3). Основні фактори росту включають збільшення удвічі площ під деревними/трав'яними енергетичними рослинами, а також ріст врожайності цих культур і силосу кукурудзи на біогаз. Прогнозується, що у 2050 р. 10% теоретичного потенціалу деревних/

трав'яних енергетичних рослин буде використано для отримання біометану шляхом термохімічної газифікації біомаси. Крім того, передбачається, що у 2050 р. буде вироблятися біодизель з олійних енергорослин, які вирощуються на незадіяних сільськогосподарських або малопродуктивних землях.

У поточному потенціалі біомаси загальна частка енергетичних рослин становить 21%, приблизно порівну між деревними/трав'яними культурами (тверде біопаливо) та силосом кукурудзи (біогаз). До 2050 р. ця частка може зрости до 26% із найбільшим внеском деревних/трав'яних енергорослин (16%), призначених для отримання твердого біопалива (див. табл. 3).

Однією з найбільш точних оцінок потенціалу є використання аналізу супутникових знімків, який дозволяє врахувати землі, які фактично знаходяться у сільськогосподарському обробітку, хоча формально можуть належати до інших категорій земель (наприклад, землі запасу). Така оцінка потенціалу земель, доступних для вирощування енергетичних рослин, була виконана в рамках проєкту Bioplant-EU програми Горизонт 2020. За п'ятирічний період було проаналізовано рослинний покрив земель в Україні та визначено ділянки площею 10 га та більше, що не були задіяні в сільськогосподарському виробництві протягом щонайменше п'яти років, та які не належать до заповідних чи природоохоронних територій. Було ідентифіковано 30570 земельних ділянок загальною площею 820,42 тис. га (рис. 3).

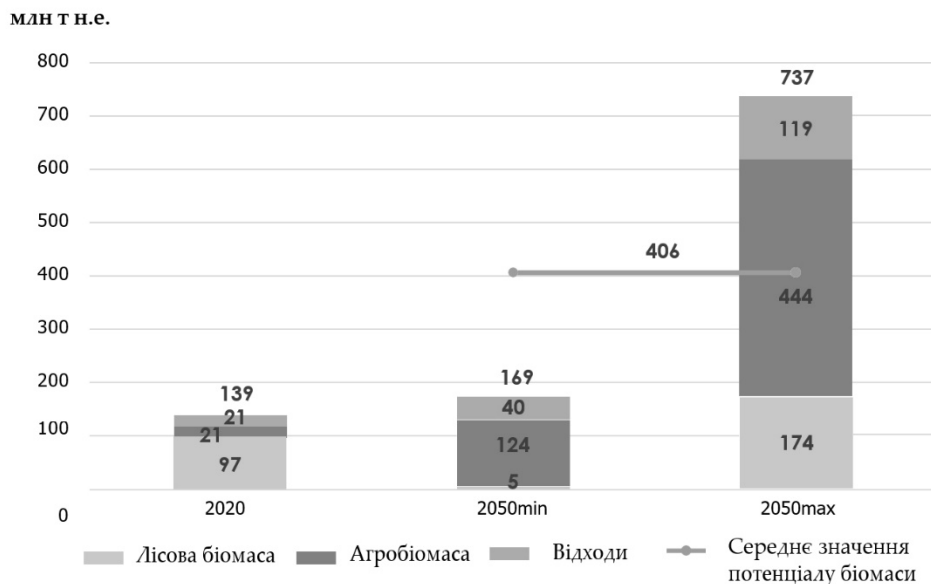


Рис. 2. Споживання біомаси у 2020 р. і потенціал біомаси до 2050 р. в ЄС-27 та Об'єднаному Королівстві [7]

Табл. 3. Оцінка поточного і перспективного потенціалу енергетичних рослин в Україні¹⁾ [9]

Вид біомаси / біопалива	Теоретичний потенціал виробництва	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)		
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е./рік	Частка загального потенціалу біомаси, %
ТВЕРДА БІОМАСА:	млн т/рік			
Верба, тополя, міскантус на тверде біопаливо:				
2021 р. (0,5 млн га)	6,00	100	2,58	10
2050 р. (1 млн га) ^{2) 3)}	18,00	90	6,96	16
РІДКІ БІОПАЛИВА:	млн л/рік			
Біодизель з олійних енергетичних рослин:				
2050 р. (0,5 млн га)	360	100	0,29	1
2050 р. (1 млн га)	720	100	0,58	1
БІОГАЗ/БІОМЕТАН:	млрд м ³ CH ₄ /рік			
Біогаз з силосу кукурудзи як енергетичної рослини:				
2021 р. (1 млн га)	3,00	100	2,57	10
2050 р. (1 млн га) ⁴⁾	3,75	100	3,22	8
Біометан, отриманий шляхом термічної газифікації біомаси деревних/трав'яних енергетичних рослин: 2050 р. (1 млн га) ²⁾	5,63	10	0,44	1
ВСЬОГО:				
2021 р. (поточний потенціал)			5,44	21%
2050 р. (перспективний потенціал)			11,20	26%

1) Без урахування тимчасово окупованих територій України станом на 2021 рік.

2) У 2050 р. 10% теоретичного потенціалу деревних/трав'яних енергетичних рослин відведено на отримання біометану шляхом термохімічної газифікації біомаси.

3) Передбачено ріст врожайності у 1,5 разів.

4) Передбачено ріст врожайності у 1,25 разів.

На сьогодні плантації енергетичних рослин в Україні займають лише близько 6 тис. га. При цьому загальні площі, що можуть бути задіяні для цього без негативного впливу на виробництво продуктів харчування і кормів, оцінюються різними експертами у 3...8 млн га [2, 11]. Наразі в Україні вирощують, в основному, вербу і міскантус гігантський. Окрім зазначених культур, Державний реєстр сортів рослин придатних для поширення в Україні, включає також павловнію, просо прутоподібне, міскантус цукрокрітковий та міскантус китайський.

Найбільш активними і відомими компаніями на ринку енергетичних рослин України є «Салікс Енерджі», «УкрАгроЕнерго», «ЕнергоАграр», «Екосолум», «Енер-

гетична верба». Всі зазначені компанії виконують продаж посадкового матеріалу, консультують з вибору енергетичних рослин для умов земельної ділянки, надають послуги з посадки плантації та догляду за нею. Найбільші плантації має ТОВ «Салікс Енерджі» – 1700 га у Волинській та Львівській областях (табл. 4). Окрім плантацій, енергетичний кластер цієї компанії включає три котельні на деревних трісках загальною потужністю 3,4 МВт у населених пунктах Іваничі, Павлівка і Нововолинськ Волинської області. Деревне біопаливо для котелень постачається з власних плантацій верби ТОВ «Салікс Енерджі». Енергетичний кластер компанії успішно функціонує з 2014 року.



Рис. 3. Потенціал малопродуктивних та деградованих земель для вирощування енергетичних рослин в Україні [10]

Табл. 4. Основні компанії на ринку енергетичних рослин України [12]

Назва компанії	Висаджені площі енергетичних рослин компанії, га (області України) ¹⁾	Додаткова інформація про діяльність компанії
ТОВ «Салікс Енерджі»	1700 га верби (Волинська, Львівська)	Надання в оренду посадкової техніки. Наявність власних сортів енергорослин (верба).
ТОВ «УкрАгроЕнерго» (Група компаній «Укртепло»)	82 га (Київська, Житомирська)	Надання в оренду посадкової техніки.
ТОВ «ЕнергоАграр» ²⁾	400 га (Київська), 40 га (Івано-Франківська), 50 га (Житомирська)	Надання в оренду посадкової техніки (власного дизайну та конструкції). Наявність власних сортів енергорослин (міскантус).
ТОВ «Екосолум»	165 га (Сумська, Полтавська, Кіровоградська, Івано-Франківська, Закарпатська)	Наявність ліцензійного посадкового матеріалу (шведські сорти верби і тополі).
ТОВ «Енергетична верба»	10 га верби (Київська, Вінницька, Житомирська)	Наявність власних сортів енергетичних рослин (верба).

1) Для всіх компаній, крім ТОВ «ЕнергоАграр», висаджені площі співпадають з власними площами.

ТОВ «ЕнергоАграр» має власну плантацію енергетичних рослин (190 га) у Хмельницькій області.

2) Послуги з посадки плантації з наданням гарантій схожості за умови використання посадкового матеріалу ТОВ «ЕнергоАграр».

Техніко-економічне обґрунтування проєктів вирощування енергетичних рослин для умов України

Проекти з вирощування енергетичних рослин є доволі важкими для практичної реалізації, оскільки чутливі до багатьох факторів, що впливає на їх економічні показники. Зазвичай термін окупності таких проєктів становить 7...9 років, що є на межі рентабельності і економічної доцільності. Біоенергетична асоціація України розробила і запропонувала кілька інструментів стимулювання розвитку даного сектору в країні [13]. Одним з них є уведення державної підтримки

на вирощування енергетичних рослин. За субсидії 700...800 євро/га термін окупності відповідних проєктів може скоротитися до близько 5...7 років в залежності від виду культури та вихідних умов.

Інші механізми підтримки сектору енергетичних рослин, запропоновані БАУ, включають збільшення строку договору оренди землі до 20 років; спрощення оренди малопродуктивних земель для вирощування енергорослин (без проведення земельних торгів); обмеження максимального розміру орендної плати за малопродуктивні та деградовані землі, на яких розташовані плантації,

Табл. 5. ТЕО проєктів виробництва деревних трісок з плантацій енергетичної верби і міскантуса

Показники	Верба (в скобках вказано значення при субсидії 700 євро/га)	Міскантус (в скобках вказано значення при субсидії 700 євро/га)
Основні характеристики плантації:		
Площа плантації, га	1200	400
Цикл вирощування, років	3	1
Площа плантації, яка щорічно збирається, га	400	400
Прогнозована врожайність біомаси*, т/га/рік	20	20
Відстань до локального складу на полі, км	2	2
Відстань до центрального складу, км	25	25
Вихідні економічні дані проєкту:		
Капітальні витрати, млн грн, у тому числі:	128,3 (93,3)	70,7 (59,1)
- машини і обладнання	58,3	47,6
- саджанці і добрива	70,0 (35,0)	23,1 (11,5)
Капітальні витрати питомі, євро/га	2570 (1870)	4250 (3550)
Щорічна вартість оренди 1 га (без ПДВ), грн/рік	1500	1500
Площа земель в оренді, га	1200	400
Мінімальна заробітна плата працівників, грн/міс.	10000	10000
Частка кредитних коштів, %	60	60
Ставка дисконтування, %	6	6
Ціна продажу трісок з біомаси (без ПДВ), грн/т	2000	3000
Ціна заміщеного природного газу (без ПДВ), тис. грн/1000 м ³	12,9	12,9
Потужність котельні, МВт	15,2	8,8
Основні економічні показники реалізації проєкту:		
Внутрішня норма рентабельності (IRR)	14,7% (18,3%)	17,8% (20,8%)
Чиста приведена вартість (NPV), млн грн	184,3 (216,9)	97,9 (108,6)
Простий термін окупності, років	8,7 (7,6)	6,8 (6,1)
Дисконтований термін окупності, років	10,6 (8,9)	8,1 (7,1)
Індекс прибутковості (PI)	2,4 (3,3)	2,4 (2,8)

* За вологості 50% для верби та 20% для міскантуса.

до 5% нормативної грошової оцінки. Таке обмеження унеможливить непередбачувану зміну орендної плати протягом строку оренди та позитивно вплине на економічні показники проєктів з вирощування енергетичних рослин. Відповідні законопроекти було розроблено та зареєстровано у Верховній Раді України ще у 2021 році (№ 5227 та № 5228 від 12.03.2021). Законопроект № 5227 також закладає законодавчі основи для механізму підтримки даного сектору біоенергетики, оскільки у ньому передбачено, що стимулювання виробництва та споживання енергії з АДЕ, може здійснюватися шляхом державної підтримки вирощування енергетичних рослин у порядку, визначеному Кабінетом Міністрів України.

Приклади ТЕО проєкту з вирощування енергетичної верби і міскантуса з метою виробництва і продажу трісок представлено в табл. 5. За існуючих умов, простий термін окупності проєкту становить 8,7 років для верби та 6,8 років для міскантуса. При наявності субсидії 700 євро/га для верби і для міскантуса простий термін окупності скоротиться до 7,6 та 6,1 років, відповідно. Кращі економічні показники можна отримати, якщо компанія, яка реалізує крупний проєкт з вирощування енергетичних рослин, вже має власну техніку і її покупку не треба враховувати у капітальних витратах. За таких умов, простий термін окупності проєкту для верби скоротиться до 6,9 років (5,8 років при субсидії 700 євро/га), а для міскантуса – до 3,9 років (3,2 роки при субсидії 700 євро/га). Можливим варіантом (за відсутності власної техніки) є покупка обладнання для збору врожаю і оренда техніки для закладання плантації.

Висновки та рекомендації для України

Вирощування енергетичних рослин є важливим і перспективним напрямком розвитку біоенергетики України. З біомаси енергетичних рослин можна отримувати тверді (тріски, гранули, брикети), рідкі (біодизель, біоетанол) та газоподібні (біогаз, біометан) біопалива для ефективного заміщення викопних енергоносіїв. Суттєвою перевагою енергетичних рослин є забезпечення надійності і сталості поставок біомаси. Вже сьогодні в країні є приклади успішної діяльності комерційних компаній на цьому ринку. Україна має значний потенціал для розвитку даного сектору завдяки наявності великих площ незадіяних сільськогосподарських та малопродуктивних/деградованих земель. За поточних умов, проєкти з вирощування енергетичних рослин знаходяться на межі рентабельності і тому є малопривабливими для значних інвестицій. Для покращення економічних показників таких проєктів вважаємо за необхідне запровадити механізми стимулювання, запропоновані БАУ і передбачені проєктами законів

№ 5227 та № 5228 від 12.03.2021. Зокрема, ефективною підтримкою буде введення державної субсидії на вирощування енергетичних рослин у розрахунку на гектар площі плантації. Впровадження запропонованих механізмів підтримки дозволить суттєво підвищити привабливість проєктів з вирощування енергетичних рослин для інвестицій. Це сприятиме досягненню енергетичної незалежності України і розвитку місцевої економіки регіонів, де розташовані плантації енергетичних рослин.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar.* <https://phyllis.nl/>
2. Tryboi O., Zheliezna T., Drahnev S. Agricultural biomass feedstock for biofuels production in Ukraine // *Technium*. – 2023, v. 14, p. 94-99. <https://doi.org/10.47577/technium.v14i.9686>
3. Кургак В.Г., Слюсар С.М. Продуктивність багаторічних трав'янистих рослин при вирощуванні для енергетичних потреб // *Вісник аграрної науки*. – 2021, т. 99, № 11, с. 48-54. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-06>
4. Гелетуша Г.Г., Железна Т.А., Трибой О.В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. Частина 2 // *Промислова теплотехніка*. – 2015, т. 37, № 5, с. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07>
5. Драгнев С.В., Железна Т.А., Баишовий А.І. Техніко-економічне обґрунтування проєктів виробництва твердого біопалива з біомаси від обрізки багаторічних сільськогосподарських насаджень в Україні // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2021, т. 43, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2021.8>
6. Гелетуша Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В., Баишовий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1 // *Промислова теплотехніка*. – 2018, т. 40, № 4, с. 62-68.
7. Geelen J., Jossart J.M., Nicolescu D. Biomass Supply. Bioenergy Europe Statistical Report, 2022.
8. Faaij A.P.C. Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature. Bioenergy Europe materials, 2018. <https://energy.nl/media/downloads/Bioenergy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final.pdf>

9. Гелету́ха Г.Г., Желєзна Т.А., Кучерук П.П., Драгнєв С.В. Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України // Теплофізика та теплоенергетика. – 2023, т. 45, № 2, с. 77-86. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
10. *Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe* – Bioplat-EU, EU Horizon 2020 project, 2018-2021. <https://bioplat.eu/>
11. *Ivanina V.* Report of general understanding of marginal lands. Horizon 2020 Project SEEMLA, 2016
https://www.seemla.eu/wp-content/uploads/2019/01/Final_D2.1_report-IBCSB_forsubmission-29072016_WB-finalized.pdf
12. Трибой О.В. Вирощування та постачання енергетичних рослин на об'єкти енергетики. Презентація на тренінг-курсах з підвищення кваліфікації працівників у секторі біоенергетики, 08.12.2023.
<https://uabio.org/news/15539/>
13. Гелету́ха Г.Г. Енергетичні рослини для біоенергетичних проєктів: бар'єри та перспективи в Україні. Презентація на семінарі «Енергетичні культури для біоенергетичних проєктів: перспективи для України», 09.09.2020, Київ.
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/09/Geletukha-energy-crops-09-September-2020.pdf>

CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE GROWING AND USE OF ENERGY CROPS IN UKRAINE

Tryboi O.V.¹, Zheliezna T.A.², Drahnev S.V.³

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

¹*Orcid.org/0000-0002-8824-5074, e-mail: tryboi@secbiomass.com*

²*PhD (Engin.), orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com*

³*PhD (Engin.), orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.8>

The purpose of the work is to analyze state of the art of Ukraine's energy crops sector, as well as to develop recommendations for creating favorable conditions for the implementation of respective projects in the country. Energy crops are plants that are grown to obtain biomass as a fuel or feedstock for the further production of energy, biomass fuels or biofuels. Their advantage is the possibility of cultivation on marginal or low-quality lands, that is those that are unsuitable for the cultivation of common agricultural crops. Wood and grass energy crops have good fuel characteristics, which are close to those of forest wood. As for chlorine content and ash melting point, these indicators are much better than those of straw. In Ukraine, as in the EU, the potential for growing energy crops is determined mainly by the available area of unused agricultural and low-productivity land on which respective plantations can be created. Experts of the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine estimate the current economic potential of energy crops for obtaining various types of biomass fuels in Ukraine as 5.44 Mtoe/yr (2021). By 2050, this potential may more than double, reaching 11.20 Mtoe/yr. In the current Ukraine's biomass potential, the total share of energy crops is 21%, approximately equally divided between wood/grass crops (solid biomass biofuel) and corn silage (biogas). By 2050, this share may increase to 26%, the largest contribution being from wood/grass energy crops (16%) intended for solid biomass fuel production. Projects on the cultivation of energy crops are quite difficult for practical implementation as they are sensitive to many factors, which affects their economic performance. Usually, the payback period of such projects is 7...9 years, which

is on the verge of profitability and economic feasibility. The Bioenergy Association of Ukraine has elaborated several tools to stimulate the development of this sector in the country. Implementation of the suggested support mechanisms will significantly increase the attractiveness of projects on energy crops cultivation for investment.

References 13, table 5, figures 3.

Key words: biomass, biomass potential, biomass fuel, energy crops, energy willow, miscanthus

1. *Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar.* <https://phyllis.nl/>

2. *Tryboi O., Zheliezna T., Drahnev S. Agricultural biomass feedstock for biofuels production in Ukraine // Technium. – 2023, v. 14, p. 94-99. <https://doi.org/10.47577/technium.v14i.9686>*

3. *Kurhak V., Sliusar S. Produktivnist bahatorichnykh travianystykh roslyn pry vyroshchuvanni dlia enerhetychnykh potreb [Productivity of perennial herbal plants when grown for energy needs] Bulletin of Agricultural Science, 2021. V. 99 (11). P. 48-54. doi: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-06> (Ukr.)*

4. *Geletukha G., Zheliezna T., Tryboi O. Perspektyvy vyroshchuvannia ta vykorystannia enerhetychnykh kultur v Ukraini. Chastyna 2 [Prospects for growing and use of energy crops in Ukraine. Part 2] Industrial Heat Engineering, 2015. V. 37 (5). P. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07> (Ukr.)*

5. *Drahnev S., Zheliezna T., Bashtovyi A. Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia proektiv vyrobnytstva tverdogo biopalyva z biomasy vid obrizky bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzhen v Ukraini [Feasibility study of projects for the production of solid biofuels from biomass of agrarian plantations pruning and removal] Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2021. Vol 43 (2). P. 68-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2021.8> (Ukr.)*

6. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S., Bashtovyi A. Analiz mozhlyvosti vyrobnytstva i spozhyvannia palyvnykh bryketiv z biomasy silskohospodarskoho pokhodzhennia v Ukraini. Chastyna 1 [Analysis of possibilities for the production and consumption of agrobiomass briquettes in Ukraine. Part 1] Industrial Heat Engineering, 2018. Vol 40 (4). P. 62-68. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.09> (Ukr.)*

7. *Geelen J., Jossart J.M., Nicolescu D. Biomass Supply. Bioenergy Europe Statistical Report, 2022.*

8. *Faaij A.P.C. Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature. Bioenergy Europe materials, 2018. <https://energy.nl/media/downloads/Bioenergy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final.pdf>*

9. Geletukha G., Zheliezna T., Kucheruk P., Drahniiev S. Analiz perspektyvnykh napriamkiv vykorystannia enerhetychnoho potentsialu biomasy Ukrainy [Analysis of prospective directions for using ukraine's biomass potential for energy] Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2023. Vol 45 (2). P. 77-86. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9> (Ukr.)
10. *Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe – Bioplat-EU*, EU Horizon 2020 project, 2018-2021. <https://bioplat.eu/>
11. Ivanina V. Report of general understanding of marginal lands. Horizon 2020 Project SEEMLA, 2016 https://www.seemla.eu/wp-content/uploads/2019/01/Final_D2.1_report-IBCSB_forsubmission-29072016_WB-finalized.pdf
12. Tryboi O. Vyroshchuvannia ta postachannia enerhetychnykh roslin na obiekty enerhetyky [Cultivation and supply of energy plants to energy facilities] Presentation at training courses on improving the skills of workers in the bioenergy sector, 08.12.2023. <https://uabio.org/news/15539/> (Ukr.)
13. Geletukha G. Enerhetychni rosliny dlia bioenerhetychnykh proektiv: bariery ta perspektyvy v Ukraini [Energy plants for bioenergy projects: barriers and prospects in Ukraine] Presentation at the seminar "Energy crops for bioenergy projects: prospects for Ukraine", 09.09.2020, Kyiv. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/09/Geletukha-energy-crops-09-September-2020.pdf> (Ukr.)

Отримано 15.01.2024

Received 15.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 697.347

РЕКОНСТРУКЦІЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ЗІ ЗБЕРЕЖЕННЯМ ДІЮЧИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ

Тарадай О.М.¹, Яременко М.О.², Павлюк Н.Ю.³, Дяченко С.В.⁴

¹докт. техн. наук, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, ORCID: 0000-0002-4239-9895, alekst1704@gmail.com.

²канд. техн. наук, ТОВ «Дивайс», вул. Мефодіївська, 11, м. Харків, 61037, Україна, генеральний директор, ORCID: 0009-0005-5593-5086, mayaremenko07@gmail.com.

³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., ORCID: 0000-0001-5415-2454, nonna.ittf@gmail.com.

⁴аспірант, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна, зав. навчальної лабораторії кафедри теплогазопостачання і вентиляції, ORCID: 0000-0003-0187-0684, dyachenkosv460@gmail.com.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.9>

В статті розглянуто основні конструктивні недоліки вертикальних однострубних систем опалення. Обґрунтовано необхідність їх реконструкції на горизонтальні поквартирні системи опалення. Розглянуто практичний досвід переобладнання вертикальної нерегульованої системи опалення в регульовану поквартирну з установленням лічильників тепла в багатоповерховому житловому будинку без зміни його джерела теплоти.

The article discusses the main design shortcomings of vertical single-pipe heating systems. The necessity of their reconstruction into horizontal apartment heating systems is substantiated. The practical experience of converting a vertical unregulated heating system into a regulated apartment heating system with the installation of heat meters in a multi-story residential building without changing its heat source is considered.

Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, облік тепла, система опалення, теплоспоживання.

Вступ. Системи теплопостачання є одними з найскладніших інженерних систем інфраструктури будь-якого міста або населеного пункту. Більша частина тепла, а відповідно і витрачених в Україні паливно-енергетичних ресурсів, йде на опалення житлових будинків. Понад 50% усіх витрат у житлово-комунальній сфері у квитанції власника квартири - це вартість опалення.

Загальновідомо, що з трьох складових будь-якої системи теплопостачання: "джерело-теплова мережа-споживач тепла" в найгіршому стані перебувають системи опалення житлових будинків, особливо багатоповерхових.

Жахливий стан споживачів тепла практично зводить нанівець усе найкраще, що робиться з удосконалення джерел теплоти, і призводить до колосальної перевитрати коштів.

Метою статті є обґрунтування необхідності реальної реконструкції діючих зараз у більшості багатоповерхових житлових будинків України однострубних вертикальних загальнобудинкових систем

опалення на поквартирні горизонтальні. Необхідність реконструкції наявних систем опалення диктується економічними міркуваннями щодо витрат паливно-енергетичних ресурсів, вимогами сучасних нормативів і головне - створенням реальної можливості всім абонентам і постачальникам регулювати споживання і вироблення теплоенергії. **Методи дослідження** включають результати розрахунків та аналіз технічних рішень з модернізації існуючої системи опалення житлового багатоповерхового будинку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Статистика показує, що в Україні понад вісімдесят відсотків багатоповерхових житлових будинків - це старі будинки, що зведені в другій половині XX століття [1]. Саме в таких будинках живе більша частина населення у своїх приватизованих квартирах і систематично перевитрачає понад тридцять відсотків своїх коштів на потреби опалення. При цьому через недосконалість конструкції внутрішньобудинкових систем опалення вони ніяк не можуть вплинути на своє теплоспоживання.

Системи опалення в усіх будинках давно відпрацювали, без будь-яких планових ремонтів, тим паче капітальних, усі нормативні терміни експлуатації [2]. За своїм фактичним станом, і згідно з нормативами, всі системи потребували капітального ремонту або повної заміни ще до початку приватизації квартир, тобто тоді, коли вони належали державі, відомствам або місцевим радам.

Спільним для всіх систем опалення житлових будинків забудови двадцятого століття була повна відсутність як загальнобудинкових, так і тим більше квартирних приладів обліку тепла.

Мешканці 85% житлових будинків України продовжують оплачувати спожиту ними теплову енергію шляхом ділення загальної кількості тепла, отриманого усім будинком за показаннями загальнобудинкового лічильника тепла, на загальну кількість квадратних метрів будинку і помноженого на кількість квадратних метрів у квартирі [3]. Звісно, це недосконалий метод обліку тепла, який ніяк не сприяє його економічному витрачання.

Для більш чіткого розуміння наявної проблеми зробимо конструктивний аналіз загальнобудинкових систем опалення багатоповерхових житлових будинків України, збудованих у минулому столітті, здебільшого в його другій половині. Як правило, це цегляні або панельні житлові будинки, що зводилися за "типовими" проєктами і були оснащені практично однотипними системами опалення. 95% цих систем - вертикальні однотрубні (рис. 1). Усі типові системи опалення є загальнобудинковими, оскільки вони опалюють весь будинок загалом, а не кожну його квартиру окремо. Для опалення кожної квартири використовуються від 2 до 6 вертикальних стояків опалення, що проходять через усі поверхи з приєднаними до них відповідно від 2 і більше нагрівальних приладів.

З огляду на саму конструкцію однотрубною вертикальної системи опалення, жодної можливості самостійного ввімкнення і вимкнення своєї квартирної системи опалення або регулювання свого теплоспоживання у мешканців немає [4, 5, 6].

Фактично вся система опалення будинку є єдиним нагрівальним приладом, регулювання якого або вимкнення можливе тільки в індивідуальному (елеваторному) тепловому пункті, розташованому на введенні теплотраси в ІТП.

Однотрубні вертикальні системи опалення з точки зору підключення нагрівальних приладів є послідовно-паралельними. При такому підключенні, в прилад надходить різна кількість "змішаного" теплоносія з різними температурними показниками. "Змішаним теплоносієм" називається теплоносій, що проходить частково через нагрівальний прилад і через перемичку, а потім змішується далі в стояку. У цих системах температура теплоносія, яка надходить до кожного нагрівального приладу, повністю залежить від його місця розташування і дій власника попереднього за ходом теплоносія приладу. За умови, якщо в будинку верхня подача теплоносія, то чим нижча поверховість розташування приладу, тим нижча температура теплоносія, що надходить до нього. При нижній подачі теплоносія зниження температури теплоносія відбувається навпаки: знизу вгору.

Відключати кожен нагрівальний прилад у таких системах теоретично можливо. Але при цьому значно змінюються розрахункові параметри теплоносія, що надходить в усі інші послідовно підключені прилади. Регулювати кожен нагрівальний прилад у цих системах неможливо. Очевидно, що влаштування квартирної обліку тепла в однотрубних вертикальних системах опалення неможливе.

З початку ХХІ століття нові багатоповерхові житлові будинки будують із горизонтальними поквар-

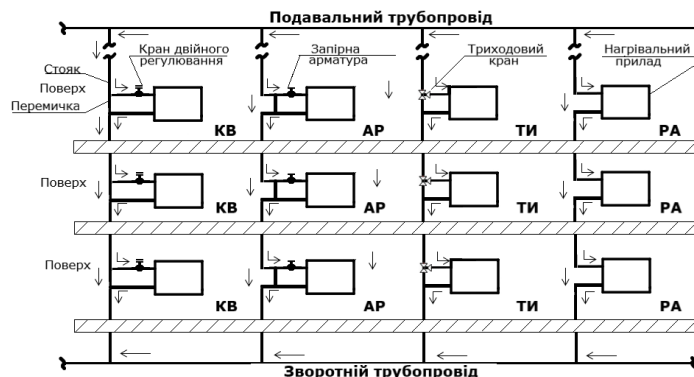


Рис. 1. Типова загальнобудинкова однотрубна вертикальна система опалення з різними конструкціями стояків

тирними системами опалення (рис. 2). У цих системах з'явилася конструктивна можливість регулювати споживання тепла за бажанням самого мешканця і оснастити кожную квартиру своїм лічильником тепла. Мешканці цих будинків, а таких будинків зараз приблизно 15% від загального багатоповерхового житлового фонду, ведуть усі свої розрахунки за своїм квартирним лічильником. У цих системах у кожного нагрівального приладу, який під'єднано паралельно, є свій регулювальний клапан із термостатичною голівкою "Danfoss", що дає змогу повністю або частково вмикати чи вимикати їх незалежно один від одного.

Накопичений двадцятирічний досвід експлуатації таких систем свідчить про їхню високу енергоефективність. Питома вартість тепла у квартирах нових будинків не менше ніж на тридцять відсотків нижча, ніж в аналогічних квартирах старих будинків, зведених у другій половині XX століття.

Саме тому у мешканців старих будинків й виникає абсолютно законне бажання переобладнати свої загальнобудинкові вертикальні системи опалення на сучасні горизонтальні двотрубні квартирні системи.

Зрозуміло, що споживача тепла не цікавлять конструкції систем опалення, їхні особливості, режими роботи джерел теплоти і теплових мереж, оснащення теплових пунктів тощо. Споживач хоче мати якісну кількість тепла у своїй квартирі і платити тільки за себе, а не за сусіда.

Як обладнати собі нову квартирну систему опалення, що для цього потрібно, чи можна організувати роботи в заселених квартирах протягом усього року, включно з опалювальним періодом, яка реальна вартість цих робіт, чи потрібно переобладнувати всі квартири будинку одночасно, чи може бути поетапне виконання робіт. Ці та багато інших запитань потребують відповіді. Ми спробуємо дати на них відповіді, виходячи з накопиченого досвіду реконструкції загальнобудинкових систем опалення, що діють повсюдно, і заміни їх на поквартирні.

Результати досліджень. Основною базою відповідей на поставлені запитання є реально виконаний нами у 2018 році пілотний проєкт реконструкції загальнобудинкової одноконтурної вертикальної системи опалення багатоповерхового житлового будинку в місті Чугуєві Харківської області. Системи опалення цього будинку вже після реконструкції функціонують п'ять опалювальних сезонів.

Вся робота базувалася на наукових розробках [7, 8, 9] і рекомендаціях Інституту теплофізики НАН України та Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

Що являє собою наша нова система і як вона в'яжеться з наявною системою опалення зображено нижче на рисунку 3.

Реальним підсумком виконаного проєкту від усього, що виконувався раніше в Україні, є переобладнання системи опалення більшої частини квартир багатоповерхового житлового будинку з одноконтурної вертикальної загальнобудинкової на двоконтурну горизонтальну поквартирну без зміни централізованого джерела - квартальної котельні. Замовником і організатором усієї роботи була Чугуївська міська рада та особисто її мер.

Монтажні роботи були проведені в період з жовтня по грудень Харківською Міжгалузевою регіональною корпорацією "Теплоенергія" та ТОВ "Дивайс" за участю спеціалістів КП "Чугуївтепло", яке безпосередньо здійснює тепlopостачання будинку.

Слід підкреслити, що всі роботи проводилися за бажанням власників квартир взимку без відселення мешканців і зупинки діючої системи опалення. Після виконання робіт і налагодження поквартирних нових систем, мешканці цих квартир самостійно регулюють споживання свого тепла. Оплату за теплову енергію вони здійснюють відповідно до показань своїх квартирних лічильників.

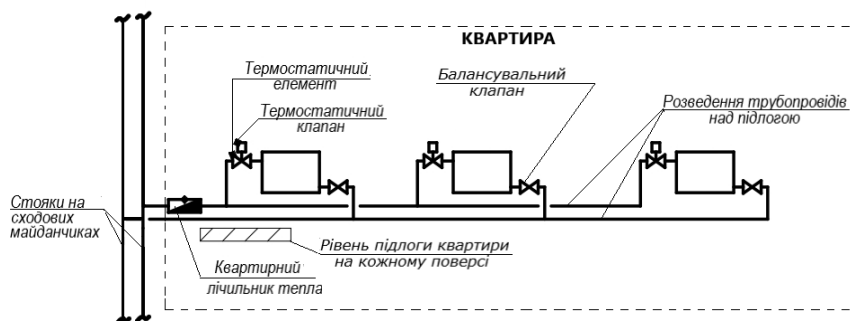


Рис. 2. Квартирна двотрубна горизонтальна система опалення з терморегулювальними кранами і термостатичними клапанами "Danfoss" біля нагрівального приладу

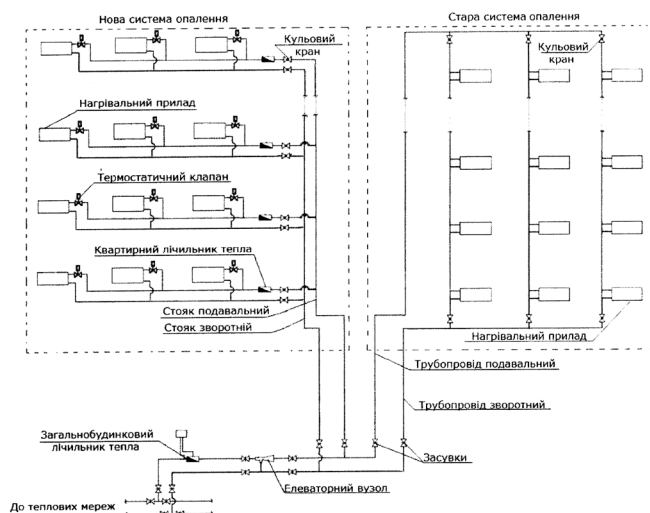


Рис. 3. Схема системи опалення житлового будинку після реконструкції

Власники квартир, які відмовилися від проведення реконструкції в їх квартирах, до цього часу забезпечуються тепловою енергією від збереженої без змін старої діючої однотрубною вертикальною системою опалення й розраховуються за отриману теплову енергію за старою системою, тобто за тарифами теплопостачальної організації.

У житловому будинку стара вертикальна нерегульована нерегульована система опалення діятиме доти, доки не буде проведено реконструкцію останньої квартири.

Відпрацьована й апробована нами методика переобладнання систем опалення також може бути застосована в житлових будинках, які мають часткові або повні руйнування.

Війна показала, що навіть відносно невеликі руйнування загальнобудинкової вертикальної однотрубною системи опалення в одній квартирі потребують негайного тривалого відключення всього будинку зі зливом теплоносія. Це означає, що сотні людей залишаються на тривалий час без тепла.

Сьогодні, коли триває ця жахлива війна і існують наявні руйнування багатоповерхових житлових будинків та їх систем опалення, проводити відновлювальні роботи за старими збитковими нерегульованими і невідключуваними схемами ми не маємо права.

Проекти реконструкції загальнобудинкової частини системи опалення та кожної квартири були виконані МРК "Теплоенергія" заздалегідь на замовлення власника будинку, узгоджені з теплопостачальною організацією та роздані всім власникам квартир.

Підкреслюємо, що проекти квартирних систем опалення зводилися всього до восьми типів. Кількість

таких типових проектів визначається числом кімнат у квартирах і їхнім розташуванням у кутових або середніх під'їздах.

Відносно невелика кількість проектів пояснюється тим, що практично всі будинки в Україні будувалися за так званими "типовими проектами". Так, наприклад, у Харкові в основному це проекти серії 464, 468, 38, П-57.

Роботи з монтажу системи опалення проводилися в такій послідовності.

На першому етапі було змонтовано нову розвідну систему трубопроводів від індивідуального теплового пункту (елеваторного вузла) до кожної квартири житлового будинку.

Розвідна система являє собою горизонтальні подавальні та зворотні трубопроводи, які були прокладені в підвалі будівлі. Можливе їх прокладання також і горищем, технічним поверхом або технічним підпіллям. Ці трубопроводи ретельно теплоізолюються. Горизонтальні трубопроводи підводяться до вертикальних подавальних і зворотних стояків, які прокладаються у кожній сходовій клітці по всій її висоті. Стояки також ретельно теплоізолюються.

У стояках на кожному поверсі вварюються колектори зі штуцерами-відгалуженнями і кульовим краном із заглушкою. Кількість штуцерів-відгалужень відповідає кількості всіх квартир у під'їзді.

В індивідуальному тепловому пункті горизонтальні трубопроводи нової системи врізаються зі встановленням кульових кранів після елеватора в діючу систему опалення. Таке технічне рішення дало змогу забезпечити можливість цілорічного, включно з опалювальним періодом, підключення кожної квартири будинку за заявкою власника без зупинки діючих систем опалення.

У нашому випадку розрахунки і практика показали, що реконструкція діючого індивідуального теплового пункту, обладнаного елеваторним вузлом, не потрібна. Елеваторний вузол продовжує успішно працювати, нормально забезпечуючи стару загальнобудинкову вертикальну і нові горизонтальні поквартирні системи опалення.

Запропоноване нами рішення про подачу тепла від діючого ІТП з елеватором без його реконструкції базується не тільки на реальному стані цього об'єкту, а й є цілком обґрунтованим з наукового погляду, адже заміна загальнобудинкової однотрубною вертикальною системою опалення на індивідуальні двотрубні поквартирні, паралельно з'єднані між собою, значно зменшує загальні втрати напору системи опалення. Тому втрати напору повністю перекриваються наявним ІТП з елеваторним вузлом [10]. При цьому слід звернути увагу на вибір типу квартирних лічильників тепла. Лічильники мають бути ультразвукового типу, оскільки вони дають найменші втрати напору порівняно з іншими типами.

На другому етапі кожен власник квартири на власний розсуд мав змогу замовити монтажній організації виконання робіт із влаштування своєї системи опалення зі встановленням лічильника тепла, термостатів і нагрівальних приладів.

У нашому конкретному випадку всі мешканці будинку замовляли виконання робіт у своїх квартирах у тій самій організації, яка виконувала і перший етап робіт - Харківська МРК "Теплоенергія" і ТОВ "Дивайс".

У кожній квартирі було обладнано нову самостійну систему опалення з лічильником тепла, який встановлювали в місці, зручному для обслуговування (рис. 4).

Для зручності обслуговування постачальником тепла правильніше встановлювати квартирні лічильники тепла в захищених нішах або шафах на сходових

клітинах. Однак така планувальна можливість є далеко не у всіх існуючих житлових будинках. У нашому випадку її не було.

Нова квартирна система являє собою два горизонтальні трубопроводи діаметром 20÷25 мм, що прокладені над підлогою в кімнатах і підводки до нагрівальних приладів діаметром 15 мм (рис. 5).

Горизонтальні трубопроводи квартири були підключені до відповідних штуцерів із кранами, раніше встановленими на сходових клітинах.

Наявні нагрівальні прилади відключалися від вертикальних стояків старої системи та після промивання й очищення приєднувалися до заново прокладених квартирних трубопроводів. За бажанням власника житла замість наявних нагрівальних приладів встановлювалися більш сучасні. Заміна нагрівальних приладів проводилася за його рахунок. Перед кожним нагрівальним приладом був встановлений терморегулятор, що дає змогу мешканцю самостійно обирати і регулювати тепловий режим у будь-якій кімнаті своєї квартири.

Слід підкреслити, що заміна старих нагрівальних приладів (як правило, це чавунні радіатори) не є обов'язковою, оскільки їхня розрахункова поверхня нагріву в старих системах достатня для роботи в новій системі. Однак, така заміна вельми бажана, тому що нові нагрівальні прилади мають більш гігієнічні та естетичні показники, мають меншу ємність і, як наслідок, знижують загальну витрату електроенергії на циркуляцію теплоносія.

Оскільки проект був пілотним, то протягом перших років експлуатації було проведено цілу низку досліджень, спрямованих з метою удосконалення на визначення показників його економічної і енергетичної ефективності.



Рис. 4. Фрагмент встановлення квартирних лічильників тепла



Рис. 5. Фрагмент нового нагрівального приладу і регулятора температури "Danfoss"

Дослідження показали, що витрата тепла на опалення квартири пропорційна його опалювальній площі.

Для власників квартир, які провели заходи з заміни вікон і балконних дверей (зниження втрат тепла на 10-15%), але не провели заходи з утеплення, витрата тепла за місяць приймається за формулою:

$$Q_n = 0,72 \cdot q \cdot F,$$
 (1)

де q - тепловий потік, що витрачається на опалення 1 м² неутепленої квартири та приведений до єдиного значення температурного напору, Вт/м²;

F - опалювальна площа не утепленої квартири, м².

Якщо власник квартири здійснив заходи з повного утеплення квартири та заміни вікон і балконних дверей, то витрати тепла на її обігрів знизяться до величини:

$$Q_y = k \cdot Q_n,$$
 (2)

де k -понижувальний коефіцієнт (економія тепла), $k=0,5$.

В квартирах, де були здійснені вищеописані заходи, споживання тепла кожною квартирою знизилося на 25-30% за опалювальний період. У грошовому еквіваленті економія склала близько 5000 грн.

Теоретичний розрахунок показав, що на практиці ці дані підтвердилися.

Витрати на переобладнання системи опалення всього будинку, віднесені на одну усереднену квартиру площею 50 м², з урахуванням всього нового обладнання та матеріалів, становлять 29800 грн.

Найбільшого ефекту економії коштів власники квартир, обладнаних квартирними горизонтальними системами опалення та лічильниками тепла, отримали в жовтні, листопаді, березні, квітні, тобто в ті місяці, коли відбувалися різкі коливання зовнішньої температури. У всі інші місяці опалювального періоду економія досягалася за рахунок можливості зниження температури в

приміщеннях у період відсутності господарів, а також за рахунок створення комфортних умов у кожній кімнаті залежно від їхньої потреби.

Тому збереження діючих джерел теплоти є важливим вельми актуальним завданням з економічної точки зору.

Слід також не забувати екологічний бік питання. Тільки централізовані джерела теплоти дають нам змогу робити високоякісне очищення димових газів і здійснювати переведення котлів на альтернативні види палива.

Проведена в деяких регіонах України індивідуалізація систем опалення шляхом встановлення автономних квартирних котлів на газовому паливі завідомо призвела до погіршення екології та повністю виключила переведення систем теплопостачання на альтернативні види палива.

Затрати коштів на проведення такої поквартірної "індивідуалізації" в рази перевищують витрати за нашим проектом (табл.1).

Результат такої "реконструкції" - зруйновані системи теплопостачання низки населених місць України.

Найважливішим аспектом нашого проекту індивідуалізації загальнобудинкової системи опалення та перетворення її на поквартірну є збереження діючого джерела теплоти - квартальної котельні, тепло від якої зовнішніми тепловими мережами подається до нашої будівлі.

У містах і селищах України практично всі багатоповерхові будівлі живляться тепловою енергією від централізованих джерел: ТЕЦ, районних, квартальних або місцевих будинкових котельень. Багато джерел теплоти в Україні недовантажені через скорочення останнім часом промислового і госпрозрахункового теплового навантаження. Більшість централізованих джерел теплоти ще не відпрацювали свій технічний ресурс і є досить економічними. Їхній стан на відміну від внутрішньобудинкових систем опалення та теплових мереж не потребує термінової реконструкції.

Таблиця 1. Затрати на влаштування індивідуального поквартірного опалення житлового будинку

№ з/п	Квартири	Затрати на переобладнання систем опалення з урахуванням загально будинкових затрат, віднесених на одну квартиру (тис. грн)		
		Кількість квартир (шт.)	Сумарні затрати на квартиру	Сумарні затрати на усі квартири
1	Однокімнатні	8	23,92	191,36
2	Двокімнатні	8	26,25	210,00
3	Трикімнатні	12	30,76	369,12
4	Чотирикімнатні	4	33,98	135,92
5	Всього на будинок	32	-	933,40

Висновки.

1. Існуючі конструкції однотрубних вертикальних загальнобудинкових систем опалення, якими обладнано практично всі багатоповерхові житлові будинки України, що зведені у другій половині минулого століття, не дають жодної реальної можливості регулювання подачі тепла кожному власнику квартири. Квартирний облік тепла в цих будинках також неможливий через конструкції загальнобудинкових систем опалення.

2. Практика центрального якісного регулювання вироблення і споживання тепла за усередненим параметром пріоритетного споживача, що склалася в Україні, призводить до перевитрати до тридцяти відсотків усього тепла, що йде на опалення житлових будинків. Перехід на інші більш економічні способи регулювання відпуску та обліку тепла також не можливий через конструкції наявних внутрішньобудинкових систем опалення. Відсутність квартирних приладів обліку тепла виключає можливості економії паливно-енергетичних ресурсів на рівні пересічного споживача.

3. Без заміни у всіх старих житлових будинках однотрубних вертикальних систем опалення на двотрубні горизонтальні по квартирні, подальше вдосконалення наявних систем теплопостачання міст і населених пунктів України неможливе.

4. Реконструкція систем опалення можлива цілий рік, навіть під час опалювального сезону. Проведення монтажних робіт можливе без довгострокових зупинок усієї загальнобудинкової системи опалення. При цьому роботи можуть проводитися вибірково в будь-якій кількості квартир, а "старі" і "нові" системи опалення можуть функціонувати паралельно.

5. Пропонована нами методика виконання робіт з реконструкції систем опалення може і повинна бути використана в процесі повоєнного відновлення зруйнованої інфраструктури житлових багатоповерхових будинків.

6. Проблема реконструкції старих систем опалення житлових будинків зі збереженням діючих джерел теплоти є однією з найважливіших державних проблем житлово-комунального господарства та енергопостачання. Ціна питання та багатогранність його розв'язання потребують ухвалення та планового виконання Державної програми України, що враховує аналогічний європейський досвід.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Про комплексну реконструкцію кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду*: Закон України від 22.12.2006 № 525-V // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України.

2. *Долінський А.А., Басок Б.І., Базєєв Є.Т.* Регіональні програми модернізації комунальної теплоенергетики – інноваційна основа технологічного оновлення теплозабезпечення населених пунктів України. Частина 2. // *Комунальна та промислова теплоенергетика*. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України.–2012. – Том 34, №3. – С. 52-61.<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59496>.

3. *Про теплопостачання*: Закон України від 02.06.2005 № 2633-IV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України.

4. *Росковшенко Ю.К., Штиленко В.П.* Індивідуальне автоматичне регулювання та облік теплової енергії в системах водяного опалення // *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*: Науково-технічний збірник. – Київ, 2013. №. 4. – С. 238–243. http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef_2013_4_46.

5. *Любарець О.П., Зайцев О.М., Любарець В.О.* Проектування водяних систем опалення//Посібник для проектувальників, інженерів і студентів ВНЗ. – Відень – Київ – Сімферополь, 2010. – 201 с.

6. *Тарадай О.М., Бугай В.С., Гвоздецький О.В., Дяченко С.В.* Вплив конструкції внутрішньобудинкових систем опалення на вибір режимів регулювання централізованого теплопостачання // *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: збірник праць*. – Київ, 2022. – С. 66–73. http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/sbornik_2022.pdf.

7. *Taraday O., Sigal O., Bugai V., Pavliuk N., Shakhnenko Y.* Reconstruction of heating systems of existing residential buildings by means of equipping apartment heating systems with heat meters // *Науковий вісник будівництва Харків: ХОТВ АБУ. – ХНУБА*, 2019. №3(97). – С. 70-74.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_97_3_15.

8. *Тарадай О.М., Покровський Л.Л., Редько О.Ф., Яременко М.О.* Централізоване поквартирне опалення з регулюванням та комерційним обліком відпуску тепла//*Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: зб. наук. праць*. – Київ: КНУБА, 2010. Вип. № 14. – С.36–42.

9. *Тарадай О.М., Бугай В.С., Гвоздецький О.В., Дяченко С.В.* Досвід поетапного переобладнання загальнобудинкової вертикальної системи опалення в поквартирну горизонтальну//*Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. – Харків: 2023. № 206. – С. 53–62. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_206.pdf.

10. *Пирков В.В.* Сучасні теплові пункти. Автоматика та регулювання. – К.: ІІ ДП «Такі справи», 2008.– 252 с.

RECONSTRUCTION OF HEATING SYSTEMS IN RESIDENTIAL BUILDINGS WHILE MAINTAINING EXISTING HEAT SOURCES

Taradai O.M.¹, Yaremenko M.O.², Pavliuk N.Y.³, Diachenko S.V.⁴.

¹Dr. Sc. (Tech.), O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshala Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine, Professor of the Department of Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, ORCID: 0000-0002-4239-9895, alekst1704@gmail.com.

²PhD (Tech), LLC "Device", 11, Mefodiivska Str., Kharkiv, 61037, Ukraine, General Director, ORCID: 0009-0005-5593-5086, mayaremenko07@gmail.com.

³PhD (Tech), Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, ORCID: 0000-0001-5415-2454, nonna.itf@gmail.com

⁴postgraduate student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshala Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine, head of the training laboratory of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, ORCID:0000-0003-0187-0684, dyachenkosv460@gmail.com.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.9>

The purpose of the article is to substantiate the need for real reconstruction of single-pipe vertical centralized heating systems, which are operated in most multi-story residential buildings in Ukraine, into apartment horizontal systems. The paper presents the main design shortcomings of heating systems in residential buildings built in the second half of the 20th century. The feasibility of using horizontal apartment systems is substantiated. For the first time, the heating system was reconstructed during the heating season without displacing residents and without stopping the existing heating system. A technical solution is proposed for supplying heat to apartments from an existing individual heating station with an elevator without its reconstruction.

The article presents the results of a number of studies aimed at improving the heating system and determining the indicators of its economic and energy efficiency. Installation work can be carried out selectively in any number of apartments, and "old" and "new" heating systems can operate in parallel. The methodology for the reconstruction of heating systems presented in this paper can be used

in the process of post-war restoration of the destroyed infrastructure of the housing stock of Ukraine. Modernizing in-building systems while maintaining the existing heat source is much cheaper than decentralizing heat supply by installing independent heating systems with a gas boiler in each apartment.

The main conclusions of the article include that the reconstruction of existing heating systems is an objective necessity, without which the subscriber's influence on his heat consumption is impossible. The modernization described in this article is dictated by all the regulatory deadlines for major repairs of heating systems, which in most cases are more than twice as long.

References 10, tables 1, figures 5.

Key words: district heating, heat metering, heating system, heat consumption.

1. *Pro kompleksnu rekonstruktsiiu kvartaliv (mikroraioniv) zastariloho zhytlovoho fondu* [On the comprehensive reconstruction of quarters (neighborhoods) of outdated housing stock]: Zakon Ukrainy vid 22.12.2006 № 525-V // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. (Ukr.).

2. *Dolinskyi A.A., Basok B.I., Bazieiev Ye.T. Rehionalni prohramy modernizatsii komunalnoi teploenerhetyky–innovatsiina osnova tekhnolohichnoho onovlennia teplozabezpechennia naselenykh punktiv Ukrainy.* [Regional programs for the modernization of municipal heat and power are an innovative basis for the technological upgrade of heat supply to Ukrainian settlements.] Chastyna 2.// Komunalna ta promyslova teploenerhetyka. – K.: Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 2012. V.34, №3. P. 52–61. (Ukr.). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59496>.

3. *Pro teplopostachannia* [About heat supply]: Zakon Ukrainy vid 02.06.2005 № 2633-IV // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. (Ukr.).

4. *Roskovshenko Yu.K., Shtylenko V.P. Indyvidualne avtomatychne rehuliuвання ta oblik teplovoi enerhii v systemakh vodianoho opalennia* [Individual automatic control and metering of heat energy in water heating systems], Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Naukovo-tekhnichniy zbirnyk. Kyiv, 2013. №. 4. P. 238–243. (Ukr.). http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef_2013_4_46.

5. *Liubarets O.P., Zaitsev O.M., Liubarets V.O. Proektuvannia vodianykh system opalennia* [Design of water heating systems] // Posibnyk dlia proektuvalnykh, inzheneriv i studentiv VNZ. Viden. Kyiv. Simferopol, 2010. 201 p. (Ukr.).

6. Taradai O.M., Buhai V.S., Hvozdetzkyi O.V., Diachenko S.V. Vplyv konstrukttsii vnutrishnobudynkovykh system opalennia na vybir rezhymiv rehuliuвання tsentralizovanoho teplopостachannia [Influence of the design of intra-building heating systems on the choice of district heating control modes] // Problemy ekolohii ta ekspluatatsii ob'ektiv enerhetyky: zbirnyk prats. Kyiv, 2022. P. 66–73. (Ukr.).

http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/sbornik_2022.pdf.

7. Taraday O., Sigal O., Bugai V., Pavliuk N., Shakhnenko Y. Reconstruction of heating systems of existing residential buildings by means of equipping apartment heating systems with heat meters // Naukovyi visnyk budivnytstva Kharkiv: KhOTV ABU. KhNUBA, 2019. №3(97). P. 70-74. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_97_3_15.

8. Taradai O.M., Pokrovskyi L.L., Redko O.F., Yaremenko M.O. Tsentralizovane pokvartyrne opalennia z rehuliuванняm ta komertsiiinym oblikom vidpusku tepla [Centralized apartment heating with regulation and commercial metering of heat supply] // Ventyliatsiia, osvvlennia ta teplohazopostachannia: zb. nauk. prats. Kyiv: KNUBA, 2010. V. 14. P. 36–42. (Ukr.).

9. Taradai O.M., Buhai V.S., Hvozdetzkyi O.V., Diachenko S.V. Dosvid poetapnoho pereobladnannia zahalnobudynkovoi vertykalnoi systemy opalennia v pokvartyrnu horyzontalnu [Experience in the phased conversion of a vertical building heating system into a horizontal apartment heating system] // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. Kharkiv: 2023. № 206. P. 53–62. (Ukr.).

https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_206.pdf.

10. Pyrkov V.V. Suchasni teplovi punkty. Avtomatyka ta rehuliuвання. [Modern heating stations. Automation and regulation], K.: II DP «Taki spravy», 2008. 252 p. (Ukr.).

Отримано 21.01.2024

Received 21.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 536.24:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Гнєдаш Г.О.⁴, Мартюк О.В.⁵

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

¹член-кореспондент НАН України, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³канд. техн. наук ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴канд. техн. наук, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

⁵мол. наук. співр., e-mail: martiuko76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.10>

Наведено результати досліджень щодо створення вискоефективного утилізатора скидної теплоти димових газів установок спалювання побутових відходів та штучних палив з них. Обґрунтовано нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора з можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень пилу. Встановлено закономірності зміни основних показників теплоутилізатора в різних режимах його експлуатації протягом року в практичному діапазоні зміни вхідних параметрів теплоносії.

The research results on the creation of a highly efficient recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants are presented. A new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits is justified. The regularities of changes in the main indicators of the heat recovery exchanger in different operating modes during the year in the practical range of changes in its input parameters were established.

Бібл. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: повітрогрійний теплоутилізатор, труби з мембранами, теплова ефективність, очищення поверхні теплообміну.

Q – теплопродуктивність, кВт;

t – температура, °С;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

Індекси:

вих – на виході;

вх – на вході;

г, с.г. – гази, сухі гази;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

ут – утилізатор.

Скорочення:

ТПВ – тверді побутові відходи;

УСП – установки спалювання палива.

Вступ. Спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них є одним із способів запобігання їхнім екологічним загрозам [1, 2]. Цей спосіб охоплює сукупність технологій, в яких реалізується безпосередньо спалювання побутових відходів, або штучних палив на їхній основі, з використанням утвореної теплоти для вироблення електричної і теплової енергії. Вказані технології є досить різноманітними і мають широке застосування в розвинених країнах світу [3, 4]. При виборі вказаних технологій необхідно враховувати багато факторів технічного і вартісного характеру стосовно умов їх застосування. Важливими завданнями створення відповідних технологічних установок є забезпечення

ефективного спалювання палива і глибока рекуперація утвореної теплоти. Глибина рекуперації пов'язана зі зменшенням обсягів скидного тепла шляхом утилізації теплоти відпрацьованих димових газів.

Утилізація теплоти димових газів в таких технологічних установках є досить складним завданням через вміст у продуктах згоряння цих установок хімічно агресивних сполук у газоподібному стані, а також твердого виносу різного хімічного та фракційного складу у вигляді пилу. Тому одним із основних завдань при створенні і експлуатації систем рекуперації скидної теплоти димових газів є використання в цих системах спеціального теплообмінного устаткування

(теплоутилізаторів), що характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозійної та ерозійної дії димових газів, можливістю часткового самоочищення цих поверхонь від відкладень пилу та у разі необхідності примусового їх очищення.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Метою роботи є науково-технічне обґрунтування технічного рішення теплоутилізатора димових газів установок спалювання палив (УСП) з ТПВ та визначення показників його теплової ефективності.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- на основі досвіду використання сучасних технологій спалювання ТПВ та штучних палив типу RDF (Refused Derived Fuel) та SRF (Solid Recovered Fuels), вилучених з ТПВ, встановити основні складові димових газів;
- визначити вимоги та вихідні дані для створення теплоутилізатора для УСП та розробити його технічне рішення;
- встановити закономірності зміни основних теплових показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації УСП з ТПВ.

Методика проведення досліджень. Розроблення теплоутилізатора базувалося на основі аналізу досвіду експлуатації установок термічного знешкодження побутових відходів та багаторічному досвіді авторів щодо створення і впровадження теплоутилізаційного устаткування за промисловими печами [5, 6], які характеризуються високим рівнем запиленості та агресивності димових газів.

Розрахункові дослідження виконувались з використанням відомих методів теплового розрахунку теплообмінного устаткування та результатів досліджень процесів тепло-масопереносу і аеродинаміки у водогрійних теплообмінних апаратах систем утилізації теплоти промислових скловарних печей різного типу [6, 7].

Результати. На основі аналізу досвіду експлуатації установок спалювання побутових відходів та палив з них було встановлено, що в їхніх димових газах наявні оксиди вуглецю, азоту, сірки, аміак, бромоводень, хлористий, фтористий та йодистий водень та інші шкідливі сполуки, а також тверді частинки (пил). Цей пил містить переважно негорючі речовини, що входять до складу сміття, та продукти неповного згоряння, які існують у твердій або аерозольній формі. Концентрація твердих частинок у димових газах є зазвичай не меншою за 200 мг на 1м³ сухих димових газів у разі використання штучних палив з ТПВ та може досягати 50г на 1м³

при спалюванні власне самих ТПВ [8]. Тому основними вимогами до створення теплоутилізаційного устаткування УСП є, як зазначалось, забезпечення його високої теплової ефективності, стійкості робочих поверхонь до корозійної дії димових газів, можливості очищення цих поверхонь від відкладень технологічного пилу.

На основі висунутих вимог запропоновано технічне рішення теплоутилізатора для використання в УСП. Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння УСП шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни, або водогрійного котла. Рис. 1 ілюструє схематичне зображення цього устаткування та його теплообмінної поверхні з рухом теплоносіїв.

Теплообмінна поверхня теплоутилізатора являє собою пакет сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. На поверхню панелей з газового боку може бути нанесене захисне антикорозійне покриття. Застосовувані в панелях труби мають кільцеві турбулізатори потоку (рис. 1в) певних геометричних розмірів, які забезпечують інтенсифікацію теплообміну на їхніх внутрішніх поверхнях в 1,4 ÷ 1,8 рази за умов помірного, порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну, зростання аеродинамічного опору. Рух теплоносіїв перехреснотоківий з проходженням димових газів у міжпанельному просторі, а повітря в трубах. Конструкційне виконання теплоутилізатора дозволяє здійснювати примусове очищення панелей з газового боку стисненим повітрям через спеціальні люки.

Досвід експлуатації за промисловими печами [4–6] водогрійного теплоутилізаційного устаткування, конфігурація теплообмінної поверхні якого відповідає з газового боку конфігурації пропонованого повітрогрійного теплоутилізатора, свідчить, що конструкційне виконання панелей сприяє зменшенню їх запиленості в процесі експлуатації теплоутилізатора. Отриманий досвід свідчить також про високу ефективність очищення цієї поверхні стисненим повітрям. Таке примусове видалення відкладень пилу дозволяє практично відновлювати початкову теплопродуктивність теплоутилізатора.

Виконано розрахункові дослідження щодо показників теплової ефективності розробленого повітрогрійного теплоутилізатора димових газів у разі його використання для УСП на основі сміття. Дослідження виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за різних вхідних температур димових газів і повітря з навколишнього середовища, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня запиленості

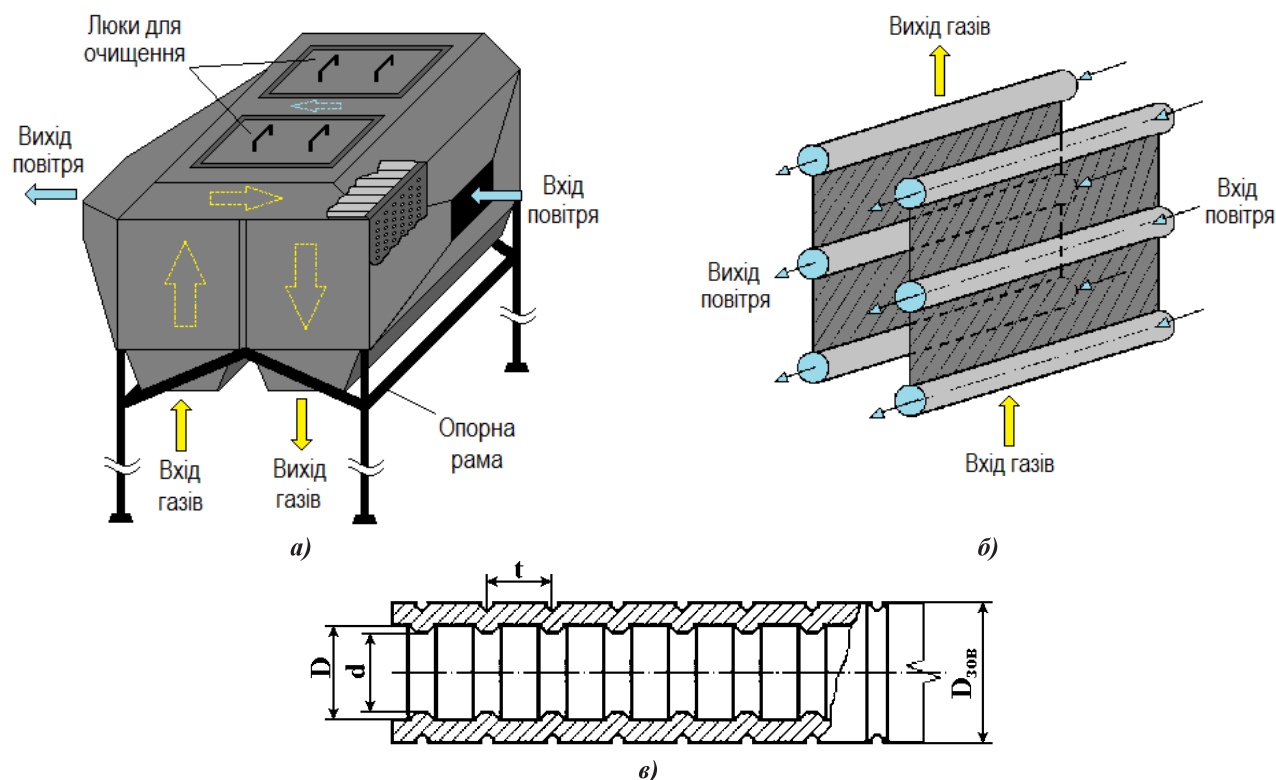


Рис. 1. Схематичне зображення повітрогрійного теплоутилізатора для УСП та його теплообмінної поверхні: а – загальний вигляд; б – теплообмінна поверхня з напрямком руху теплоносіїв; в – труба з кільцевими турбулізаторами потоку

поверхні нагрівання тощо. Вихідні режимні параметри (табл. 1) для виконання розрахунків теплоутилізатора приймалися в їхньому практичному діапазоні на 1 т/год спалювання ТПВ згідно з літературними даними [3, 4]. Вказаний в таблиці коефіцієнт запиленості визначає рівень зниження коефіцієнта теплопередачі теплоутилізатора за наявності відкладень пилу.

Результати визначення основних теплових характеристик теплоутилізатора за відсутності шару пилових відкладень на його теплообмінній поверхні наведено на рис. 2 та 3. Рис. 2 ілюструє закономірності зміни температури димових газів та повітря в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року за різних коефіцієнтів надлишку повітря в димових газах.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування пропонованого теплоутилізатора протягом року за різних значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах забезпечує їх охолодження до температури $107 \div 152 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та нагрівання повітря – до $131 \div 151 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для початкової температури газів $t_{\text{вх}}^{\text{e}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

У разі підвищення за тих же умов температури твх до $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ досягається вищий рівень підігрівання

повітря (до температури $198 \div 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$), але реалізується і збільшення вихідної температури димових газів в межах $168 \div 227 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Слід зазначити, що зменшення витрати повітря відповідно зі зміною його коефіцієнта надлишку α з 1,5 до 2,5 відповідає підвищенню рівня кінцевої температури повітря: на $9 \div 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для $t_{\text{вх}}^{\text{e}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та на $13 \div 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для $t_{\text{вх}}^{\text{e}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Вказані рівні підвищення температури повітря отримані з урахуванням того, що зі зменшенням витрати повітря відбувається зменшення швидкості його течії в трубах з кільцевими турбулізаторами потоку, яке зумовлює деяке зниження інтенсифікації теплообміну. Дана обставина вказує на те, що для ефективної експлуатації теплоутилізатора його конструкційне виконання повинно відповідати реальним режимам роботи зі зміною α в невеликих межах.

Розрахункові дані щодо закономірностей зміни за розглянутих умов теплопродуктивності теплоутилізатора $Q_{\text{ут}}$ протягом року наведено на рис. 3. За результатами досліджень значення $Q_{\text{ут}}$ змінюється в діапазоні $95 \div 274 \text{ кВт}$. Причому величина $Q_{\text{ут}}$ зростає з підвищенням початкової температури димових газів

Таблиця 1. Вихідні дані

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	1,8
Коефіцієнт надлишку повітря	1,5 ÷ 2,5
Температура димових газів на вході, °C	200 ÷ 300
Температура повітря на вході, °C	-20 ÷ +20
Вологовміст димових газів на вході, кг/кг с.г.	0,15 ÷ 0,20
Коефіцієнт запиленості теплообмінної поверхні	0,5 ÷ 1,0

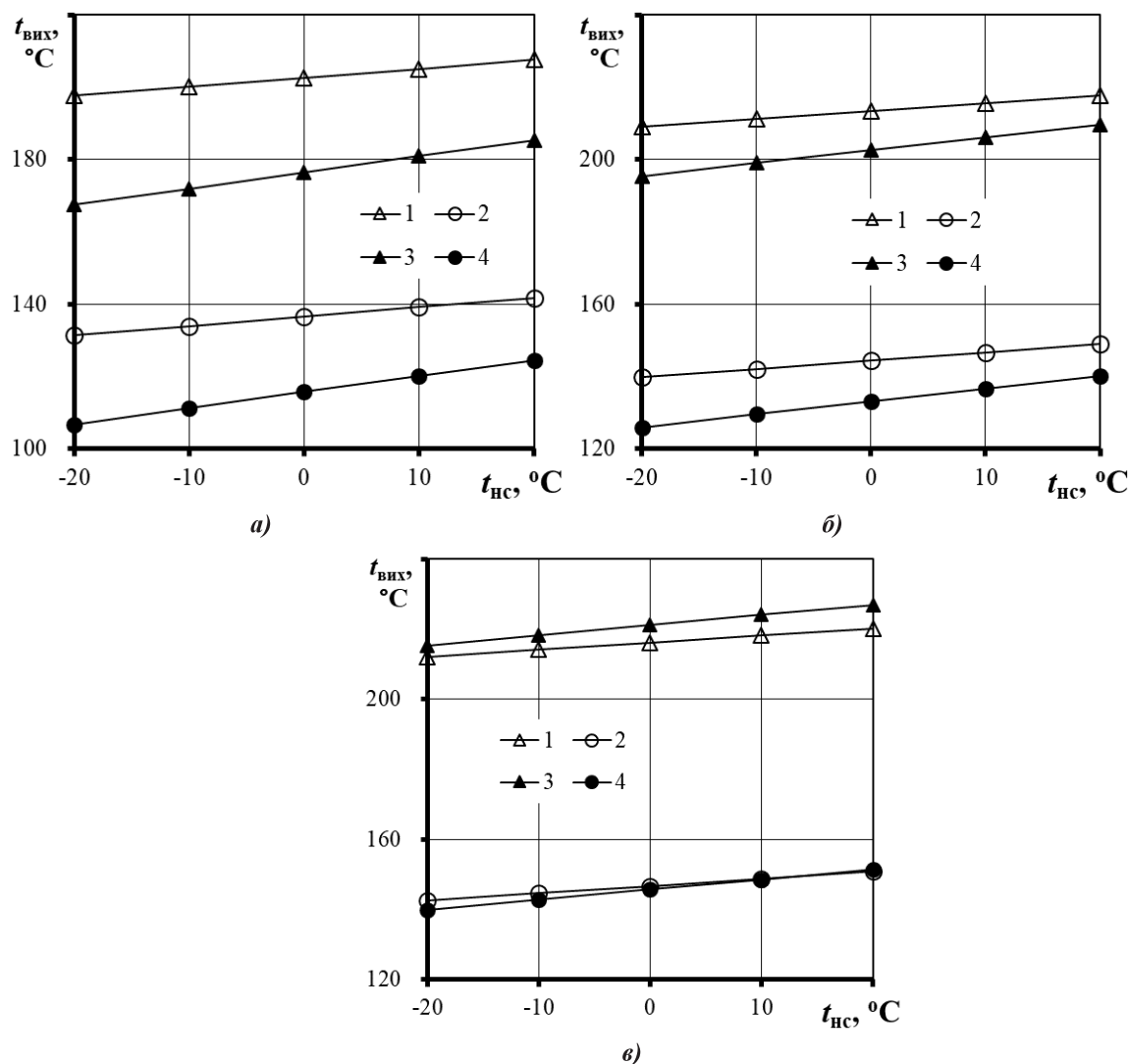


Рис.2. Залежність температур нагрітого повітря $t_{\text{вх}}^n$ (1, 2) та охолоджених димових газів $t_{\text{нх}}^n$ (3, 4) від температури навколишнього середовища $t_{\text{ср}}$ за різних температур димових газів на вході $t_{\text{вх}}^{\text{вх}}$ та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,5$ (а), $\alpha = 2,0$ (б) та $\alpha = 2,5$ (в):
1, 3 – $t_{\text{вх}}^{\text{вх}} = 300$ °C; 2, 4 – $t_{\text{вх}}^{\text{вх}} = 200$ °C

та витрати повітря і зменшується з підвищенням його температури $t_{\text{ср}}$.

За результатами досліджень також встановлено, що за розглянутих умов зміна початкового вологовмісту ди-

мових газів не впливає на їхній кінцевий вологовміст. Тобто в процесі теплоутилізації не реалізується глибоке охолодження цих газів, що забезпечує під час експлуатації робочі поверхні теплоутилізатора від корозійної дії конденсату, в якому зазвичай розчинюються корозійно активні сполуки, що містяться в димових газах.

Виконано також дослідження щодо температурних показників теплоносіїв теплоутилізатора за наявності забруднень на його теплообмінній поверхні. Дослідження виконувались в діапазоні значень коефіцієнта запиленості k від 0,5 до 1. Значення $k = 0,5$ відповідає зниженню коефіцієнта теплопередачі вдвічі за інших рівних умов. Аналіз отриманих результатів свідчить, що величина кінцевої температури нагріваного повітря за значень $k = 0,5$ зменшується в 1,3 ÷ 1,4 рази і мінімальне її значення становить 95 °С. За цих умов підвищується кінцева температура димових газів в 1,1 ÷ 1,2 рази до максимального значення 245 °С, що свідчить про недостатній рівень використання їхньої теплоти і необхідність здійснення примусового видалення пилових забруднень з поверхні теплообміну, як це і передбачено технічним рішенням теплоутилізатора.

На рис. 4 до прикладу наведено результати досліджень щодо залежності теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ теплоутилізатора від рівня запиленості теплообмінних поверхонь k за різних значень вхідних температур теплоносіїв (димових газів та повітря) та коефіцієнта надлишку повітря в димових газах $\alpha = 2,0$.

Наведені дані свідчать, що значення теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ за наявності відкладень пилу на теплообмінній поверхні за розглянутих умов змінюється

в діапазоні 88 ÷ 216 кВт. І це значення тим більше, чим менший рівень запиленості поверхні, нижча вхідна температура нагріваного повітря та вища температура димових газів менший коефіцієнт надлишку повітря. Розрахунки показали, що у разі $\alpha = 2,5$ мінімальна величина $Q_{\text{ут}}$ в процесі експлуатації теплоутилізатора знижується до 72 кВт. Для підвищення теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ необхідно виконувати періодичне очищення теплоутилізатора.

Максимальний рівень забрудненості поверхні, за якого необхідно здійснювати примусове видалення пилових відкладень визначається конкретними умовами експлуатації теплоутилізатора, а саме: швидкістю запилення поверхні нагрівання, необхідним рівнем кінцевої температури повітря, умовами технічної реалізації процесу очищення тощо.

Висновки.

1. Виконано науково-технічне обґрунтування нового технічного рішення повітрогрійного теплоутилізатора для установок спалювання побутових відходів та штучних палив з них, яке характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозії та можливістю примусового очищення цих поверхонь від відкладень пилу.

2. Виконано дослідження та визначено основні показники теплової ефективності запропонованого теплоутилізатора в залежності від початкових температур димових газів та повітря, коефіцієнта його надлишку в газах та рівня запиленості робочої поверхні. Показано, що застосування теплоутилізатора протягом року забезпечує:

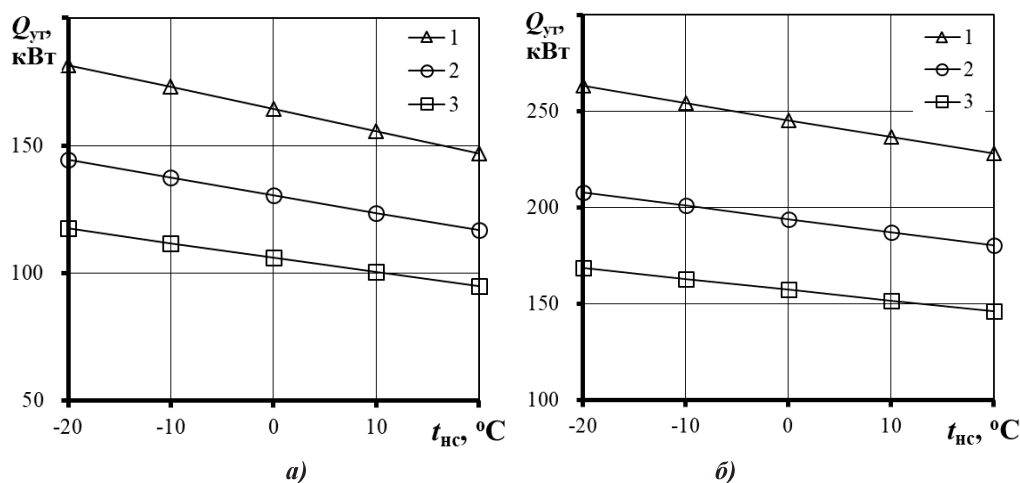


Рис. 3. Залежність теплопродуктивності теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ за різних коефіцієнтів надлишку повітря та температури вхідних газів на вході:

а) $t_{\text{вх}} = 200$ °С, б) $t_{\text{вх}} = 300$ °С; 1 – $\alpha = 1,5$; 2 – $\alpha = 2,0$; 3 – $\alpha = 2,5$

- теплопродуктивність $72 \div 274$ кВт;
- охолодження димових газів до температури $107 \div 245$ °С;
- нагрівання повітря до $96 \div 220$ °С.

3. Встановлено, що відкладення пилу на теплообмінній поверхні призводить до зменшення температури нагріваного повітря в $1,3 \div 1,4$ рази та підвищення кінцевої температури димових газів в $1,1 \div 1,2$ рази. При цьому коефіцієнт теплопередачі теплоутилізатора зменшується вдвічі.

4. Показано, що для підвищення ефективності теплоутилізації необхідно виконувати очищення робочих поверхонь у відповідності з технічним рішенням теплоутилізатора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Johnke B.* Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. Р. 455–468.
2. *Мазепа Ю. М.* Підвищення ефективності термічної інсінерації твердих побутових відходів: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.06 / Ін-т технічної теплофізики НАНУ Київ, 2019. 161с.
3. *Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report*, Stantec, 2011. 88p.

4. *Крот О. П.* Моделювання та оптимізація процесів термічного знешкодження побутових і промислових відходів у теплогенеруючих установках: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.03 / Харківський нац. універ. буд. та архіт., Харків, 2019. 329 с.

5. *Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О.* Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. Науковий вісник НЛТУ України. 2021. т. 31, №4. С. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418>

6. *Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А.І.* Результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик водогрійних теплоутилізаторів промислових печей. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. т. 44, №1. С. 84–91. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.10>.

7. *Фіалко Н.М., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Сарюгло А.Г.* Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб. Киев: «София-А». 2016. 214с. ISBN 978-966-02-7982-7.

8. *National Research Council.* (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

IMPROVING THE PLANTS EFFICIENCY OF THERMAL INCINERATION HOUSEHOLD WASTE BY RECOVERING WASTE HEAT

Fialko N.M.¹, Navrodska R.O.², Shevchuk S.I.³,
Gnedash G.O.⁴, Martiuk O.V.⁵

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department, Professor; orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

⁵Junior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: martiuko76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.10>

The work is devoted to research on the creation of recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants. The purpose of the work is to develop a technical solution for the heat recovery exchanger of waste incineration plants (WIP) and determine its thermal efficiency indicators. The main objectives of the study were to analysis of the modern experience of using the WIP and establish requirements for the creation of a exhaust gas heat recovery exchanger, develop a new technical solution for the heat recovery exchanger, and determine the change patterns in its main thermal indicators in different operating modes of the WIP. The known methods of thermal calculation of heat exchangers and the results of previous studies on the development and implementation of heat recovery equipment operating on dusty gases were used.

The results of work on the creation of a new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits are presented. The heat exchange surface of the heat recovery exchanger is composed of steel panels formed by tubes with membranes. The tubes applied have circular flow turbulizers on their internal surfaces. Turbulizers provide heat transfer intensification by 1.4 to 1.8 times with a moderate increase in aerodynamic resistance compared to other methods of heat transfer intensification. The regularities of changes in the main indicators of the heat recovery unit in different operating modes during the year in the practical range of changes in its input parameters were established. The research results show that, depending on the initial temperatures of gases and air, the excess air ratio in exhaust gases and the dust level of the working surface, the heat recovery exchanger provides heating capacity of 72-263 kW; cooling of exhaust gases to a temperature of 107-245 °C; heating of air to 96-220 °C. It was also established that the deposition of dust on the heat exchange surface of the heat recovery unit under the considered conditions leads to a decrease in the heating air temperature by 1.3-1.4 times and an increase in the final exhaust gas temperature by 1.1-1.2 times. At the same time, the heating capacity of the heat recovery exchanger is reduced by half. To increase heat recovery efficiency, it is necessary to periodically clean the working surfaces of the heat recovery unit with compressed air.

References 8, tables 1, figures 4.

Key words: air-heating heat recovery exchanger, tubes with membranes, thermal efficiency, cleaning the heat exchange surface.

1. Johnke B. Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. P. 455–468.

2. Magera Y.M. Pidvyshchennia efektyvnosti termichnoi insineratsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Improving of the efficiency of municipal solid waste thermal incineration]: manuscript ... PhD (Engin.): 05.14.06 / Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2019. 161p. (in Ukr.)

3. Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report, Stantec, 2011. 88p.

4. Krot O.P. Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv termichnoho zneshkodzhennia pobutovykh i promyslovykh vidkhodiv u teplogeneruiuchykh ustanovkakh [Modeling and optimization of incineration processes of household and industrial wastes to heat generating plants]: manuscript ... Dr. Sci. (Engin.): 05.23.03 / Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, 2019. 329 p. (in Ukr.)

5. Fialko N.M., Prokopov V.G., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Presich G.O. Osoblyvosti zastosuvannya teploutylizatsiynykh tekhnologiy dlia gazospozhyvalnykh sklovarnykh pechey [Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces]. Scientific Bulletin of UNFU. 2021. No 31(4). P. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418> (in Ukr.).

6. Fialko N.M., Prokopov V.H., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen teplotekhnichnykh kharakterystyk vodohriinykh teploutylizatoriv promyslovykh pechei [Results of experimental studies of the heat engineering characteristics of industrial furnace water-heating heat recovery units]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2022. Vol. 44, №1, P. 84–91. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.10>. (in Ukr.).

7. Fialko N.M., Navrodskaia R.A., Sherenkovskii Yu.V., Stepanova A.I., Sariohlo A.G. Utilizatsiia teplooty otkhodiashchikh gazov steklovarenykh pechei s ispolzovaniem membrannykh trub [Heat recovery of exhaust gases from glass furnaces using membrane tubes]. K.: «Sophia-A». 2016. 214p. ISBN 978- 966-02-7982-7. (in Rus.).

8. National Research Council. (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

Отримано 23.02.2024

Received 23.02.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024

УДК 621.433.2

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ З ТЕРМОХІМІЧНИМ МЕТОДОМ ОЧИСТКИ ЇХ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

Білека Б.Д.¹, докт. техн.наук, Скляренко Є.В.², канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, borbi1937@gmail.com

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, SklyarenkoEV@Nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3952-6520>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.11>

В статті викладено результати досліджень зниження викидів оксидів азоту і окису вуглецю, а також покращення теплових характеристик когенераційної установки на базі газопоршневого двигуна (ГПД), з термохімічною технологією нейтралізації шкідливих компонентів його відпрацьованих газів, та котла – утилізатора. Експериментальні дослідження проведені на спеціальній лабораторній установці. Процес нейтралізації відбувається в шарі розжареного вуглецевого матеріалу і газовому середовищі, до складу якого входять: метан, водень і окис вуглецю, що дозволяє зменшити концентрацію, зокрема, оксидів азоту і окису вуглецю в 2.5...3 рази. Остаточна нейтралізація відпрацьованих газів двигуна і утилізація їх теплового потенціалу здійснюється у котлі – утилізаторі, що зменшує забруднення довкілля тепловими і шкідливими викидами.

The article presents the results of research into reducing emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide, as well as improving the thermal characteristics of a cogeneration plant based on a gas piston engine (GPD), with thermochemical technology of neutralization of harmful components of its waste gases, and a boiler - a heat exchanger. Experimental studies were carried out at a special laboratory facility. The neutralization process takes place in a layer of red-hot carbon material and a gaseous environment, which includes: methane, hydrogen and carbon monoxide, which allows to reduce the nitrogen oxides and carbon monoxide concentration by 2.5...3 times. The final neutralization of the exhaust gases of the engine and utilization of their thermal potential is carried out in the boiler - recycler, which reduces environmental pollution by thermal and harmful emissions.

Бібл. 8, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: когенерація, термохімічна конверсія, нейтралізація шкідливих викидів.

Вступ. Підвищення ефективності паливовикористання є однією з найбільш актуальних задач, направлених на подолання проблем в енергетичному комплексі країни, які пов'язані з дефіцитом і скороченням природних запасів традиційних паливних ресурсів (природний газ, нафта, кам'яне вугілля) та постійним зростанням попиту і цін на них. В Україні посилення цих проблем є, також, наслідком низької ефективності використання енергетичного потенціалу палив. За оцінкою спеціалістів, у всьому ланцюгу енергокомплексу, коефіцієнт корисного використання паливно-енергетичних ресурсів складає близько 44%, що значною мірою, є наслідком суттєвого морального зносу енергетичного обладнання (ККД здебільш не перевищує 35 - 40 %), та його фізичного зносу (понад 90% відпрацьовало гарантований ресурс роботи).

Постановка задачі. Вирішення проблеми підвищення ефективності використання палива є актуальним

не тільки в розрізі зниження питомих витрат палива на генерацію електроенергії, тепла, пари та інше, але й з екологічної точки зору – необхідність зниження викидів шкідливих компонентів в атмосферу, з продуктами їх згоряння.

Дієвим шляхом вирішення який широко впроваджується в багатьох країнах світу, є когенераційні технології виробництва кількох енергетичних продуктів в одному технологічному процесі, зокрема, теплової і електричної енергії. Наприклад, за даними наведеними в [1], на початок третього тисячоліття, частка когенераційних електрогенеруючих потужностей в енергетиці Данії становила близько 60%, Нідерландів – 43%, Фінляндії – 33%, Австрії – 25%. Ефективність таких технологій обумовлена тим, що вони спроможні забезпечувати загальний коефіцієнт використання енергетичного потенціалу палива на рівні 80...85% і вище, порівняно з ефективністю 35...44%, на електростанціях.

Тоді ж, не дивлячись на високу ефективність, когенераційні установки в Україні, виробляли не більше 7% електроенергії і то, здебільшого, на крупних ТЕЦ.

Сьогодні цей напрямок набуває особливої актуальності в силу надзвичайного стану централізованої енергетичної системи країни і частих порушень її роботи, що спонукає до більш широкого застосування електричних генераторів на базі теплових двигунів, зокрема для аварійного енергозабезпечення. Направду, в переважній більшості вони не обладнані системами утилізації теплової енергії двигуна, що зменшує їх ефективність, а вирішення екологічної проблеми (зокрема, знешкодження оксидів азоту NO_x і окису вуглецю CO , як найбільш токсичних) стає надзвичайно актуальною задачею.

Метою даної роботи є підвищення економічних і екологічних характеристик когенераційних установок на базі теплових двигунів, з використанням термохімічного методу нейтралізації шкідливих компонентів їх відпрацьованих газів.

Основний матеріал. Зараз серед відомих когенераційних систем на базі теплових двигунів (двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), газопоршневих двигунів (ГПД), газотурбінних установок (ГТУ)) широкого поширення набули установки, схеми яких наведені на рис.1.

Обладнання таких установок індивідуальними системами виробництва електроенергії і утилізації теплової енергії (рис.1а), надає їм певну мобільність та автономність, в якості резервного (аварійного) джерела електричної і теплової енергії.

Когенераційна ж схема, що наведена на рис 1б, є надбудовою до котла - утилізатора, чи іншої теплоенергетичної установки. Процес теплової

генерації, в такій схемі, відбувається шляхом спалювання вихідного палива котла 5, в суміші з відпрацьованими газами теплового двигуна 1, і утилізації всієї теплоти теплосприймаючими поверхнями котла.

Даний спосіб забезпечує найвищу ефективність використання вихідного палива і його економії, а також розширює технологічні можливості установок, за рахунок комплексного виробництва електроенергії, гарячої води і технологічної пари. Наявність пальника 6, дозволяє забезпечувати стабільність роботи і маневреність установки у визначених технологічних режимах, навіть при відключенні ГПД.

Когенераційні установки, в якості аварійного джерела електричної та теплової енергії, як правило, розміщують в населених пунктах, на промислових, комунальних та інших об'єктах, де встановлено підвищені екологічні вимоги.

Актуальність даної роботи, в першу чергу, обумовлена низькою ефективністю використання енергетичного потенціалу, палив, що використовуються в системах живлення різних типів теплових двигунів (Отто, Дизель, газопоршневих, газотурбінних). Так, із теплового балансу, наприклад, дизельного двигуна видно, що ефективна теплота становить всього 42...45%, а решта теплоти складають втрати: з охолоджувальною рідиною - 20...35%, з маслом - 2...4%, з відпрацьованими газами - 25...40%; втратами через обгороджуючі конструкції - 2...7% і до 5% складає теплота, яка не виділилась внаслідок неповного згоряння палива [2].

Утилізація ж цих теплових втрат, дозволяє не тільки підвищити економічність двигунів, але й зменшити забруднення довкілля тепловими викидами.

Разом з тим, теплові двигуни входять до переліку основних забруднювачів навколишнього середовища.

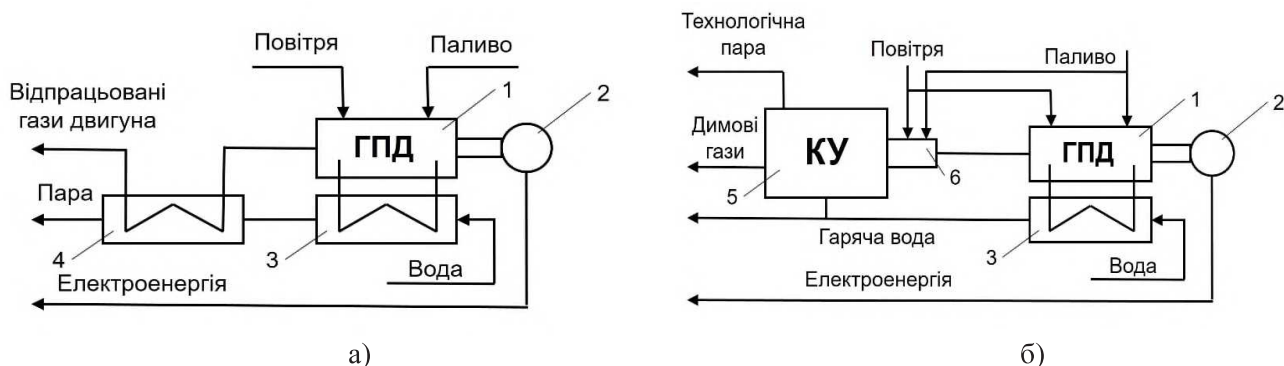


Рис. 1. Схеми когенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згоряння:
 1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – електрогенератор; 3 – теплообмінник по охолоджувальній рідині; 4 – теплообмінник по відпрацьованим газам двигуна; 5 – котел-утилізатор (КУ); 6 – пальник

Наприклад, лише доля ДВЗ автомобільного транспорту в забрудненні навколишнього середовища крупних міст (де основними є бензинові і дизельні двигуни), складає більше 60% [3].

Внаслідок специфічних особливостей протікання процесу горіння палива в циліндрі двигуна (циклічність, недостача кисню і нерівномірність складу горючої суміші по об'єму камери згорання, зони з низькою температурою внаслідок контакту суміші з охолодженими стінками циліндра, пропуски запалювання, широкі межі навантажень на двигун та ін.), в складі відпрацьованих газів з'являються значні концентрації продуктів неповного згорання палива і масла (окис вуглецю CO, вуглеводні CH, твердий вуглець C, оксиди азоту NO_x, окисли сірки, альдегіди, бензопірен і ін.). Для прикладу, в табл.1 наведено порівняльний склад відпрацьованих газів, карбюраторних і дизельних ДВЗ [4]

На відміну від цих ДВЗ, у відпрацьованих газах газопоршневих двигунів (ГПД) та газотурбінних установок (ГТУ), базовим паливом яких є газове паливо, до шкідливих речовин, що викликають найбільш негативний вплив на довкілля і здоров'я людей належать оксиди азоту (NO_x) та оксид вуглецю (CO). Характер їх утворення є різним, і в значній мірі, залежить від концентрації окисника (кисню) в зоні реакції та температури процесу. Так, оксид вуглецю утворюється при згорянні паливо повітряної суміші з певною недостачею кисню і низькій температурі, при дисоціації двоокису вуглецю (CO₂) за високої температури, а також при пропусках запалювання суміші в окремих циклах.

В утворенні оксидів азоту (NO_x) (в основному це оксид азоту NO) приймає участь азот атмосферного

повітря і азот, що міститься у паливі, за умов наявності надлишкового кисню та високої температури в зоні горіння.

Так, в [5] приведені принципові схеми видозміни оксидів азоту, в залежності від температури :

- при нормальній температурі і наявності кисню:

$$\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_5 \quad (1)$$

- при підвищенні температури цей процес проходить в зворотному напрямку:

$$\text{N}_2\text{O}_5(-1.2^\circ\text{C}) \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4(21.5^\circ\text{C}) \rightarrow \text{NO}_2(140^\circ\text{C}) \rightarrow \text{NO}(600^\circ\text{C}) \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2(1000^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Крім того, на утворення оксидів азоту, значний вплив має час їх знаходження в реакційній зоні. В умовах же робочого процесу ДВЗ, на час реакції вплинути неможливо, оскільки він визначається, в основному, частотою обертання колінчатого валу двигуна.

На практиці, для знешкодження шкідливих компонентів відпрацьованих газів теплових двигунів, розглядаються наступні шляхи:

- застосування нових палив та присадок, при згорянні яких виділяється менше токсичних речовин;
- вплив на робочий процес (внутрішня нейтралізація);
- обладнання двигунів різними системами нейтралізації газів.

Під час вибору способу нейтралізації і оцінюванню його ефективності виходять з того, щоб забезпечити викиди токсичних речовин в допустимих нормах, за незначного впливу на потужність і економічність двигуна, а також при мінімальному підвищенні вартості силової установки.

Таблиця 1. Порівняльний склад відпрацьованих газів основних типів ДВЗ

Компоненти	Бензинові двигуни	Дизельні двигуни
Азот, %	74...77	76...78
Кисень, %	0.3...8	2...18
Пари води, %	3.0...5.5	0.5...4
Вуглекислий газ, %	5...12	1...10
Монооксид вуглецю, %	1...10	0.01...0.5
Оксиди азоту, %	0.1...0.5	0.001...4
Альдегіди (в перерахунку на формальдегіди), %	0...0.2	0...0.03
Вуглеводні, %	0.01...0.1	0.01...0.5
Сірчаний газ, %	0...0.002	0...0.03
Сажа, г/м ³	0...0.04	0.01...1.1
Бенз(а)пірен, г/м ³	До 0.00002	До 0.00001

Серед шляхів впливу на робочий процес (зменшення температури згоряння) для нейтралізації оксидів азоту та оксидів вуглецю, використовують рециркуляцію відпрацьованих газів (до 10 % об'єму свіжого заряду) в систему впуску двигуна, після їх охолодження. Хоча, необхідно зазначити, що це, як правило, призводить до зменшення потужності двигуна, збільшення витрат палива і концентрації CO, а також не завжди забезпечується зниження концентрації NO_x до допустимого рівня (500...550 мг/м³). Тому, для нейтралізації цих компонентів використовують інші методи: каталітичні, термічні, рідинні, фільтри, комбіновані та ін. Найбільшого поширення набули перші два методи.

В каталітичних нейтралізаторах, в ході хімічних реакцій, вдається зменшити концентрацію газових компонентів токсичних речовин (CH і CO) до встановлених допустимих норм. Проте, при цьому, концентрація оксидів азоту практично не змінюється, або ж змінюється в незначних межах. Крім того, використання каталітичних методів нейтралізації ускладнюється значною вартістю застосованих каталізаторів.

Термічні ж методи нейтралізації передбачають «допалювання» відпрацьованих газів двигуна, наприклад, у топці котла, що дозволяє знешкодити лише горючі компоненти CO, CH і C. Оксиди ж азоту, що транзитом покидають топку котла з його димовими газами, потребують пошуку інших методів їх нейтралізації.

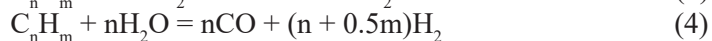
Експериментальні дослідження. Внаслідок багаторічних фундаментальних досліджень, направлених на підвищення ефективності використання вуглеводневих палив, що проводились в Інституті

технічної теплофізики НАН України, був розроблений і запропонований альтернативний підхід в розвитку когенераційних систем і підвищення їх економічних та екологічних характеристик.

На рис. 2 наведена принципова схема такої стаціонарної когенераційної установки на базі газопоршневого двигуна (ГПД) з термохімічним пристроєм нейтралізації шкідливих компонентів відпрацьованих газів, та котла – утилізатора.

В наведеній схемі, нейтралізація шкідливих компонентів відпрацьованих газів двигуна, здійснюється у термохімічному пристрої 4, в шарі розжареного вуглецевого матеріалу і в газовому середовищі, до складу якого входять: метан, водень і оксид вуглецю. Наявність цих компонентів, в реакційній зоні, дозволяє зв'язати частину вільного кисню у відпрацьованих газах двигуна, що дозволяє запобігти утворенню оксидів азоту [5,6].

Зазначені компоненти відновлювального газу утворюються при конверсії вихідного палива (рівняння 3, 4), що подається в термохімічний пристрій 4, для підтримання оптимального температурного режиму процесу:



Крім того, вони є леткими генераторного газу при газифікації твердого палива (рівняння 5, 6), що завантажується в термохімічний пристрій 4. Там формується розжарений шар вуглецевого матеріалу (коковского залишку), де і проходять реакції окиснення вуглецю, а також реакції окиснення та відновлення інших компонентів, з поглинанням чи виділенням

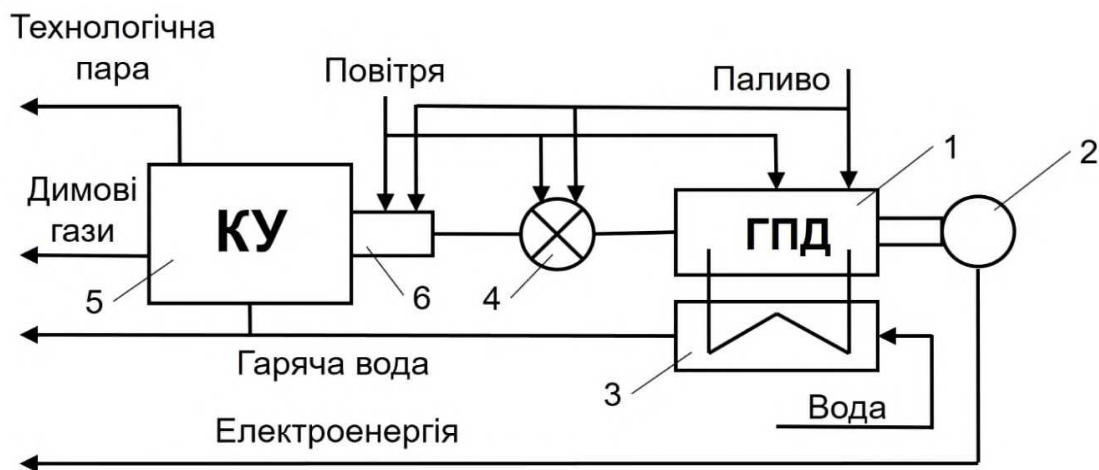


Рис. 2. Принципова схема когенераційної установки з термохімічним пристроєм нейтралізації шкідливих компонентів відпрацьованих газів:

1 – газопоршковий двигун (ГПД); 2 – електрогенератор; 3 – теплообмінник по охолоджувальній рідині; 4 – термохімічний пристрій; 5 – котел-утилізатор (К-У); 6 – пальник

теплової енергії, в МДж/кмоль [7]:



Наявність CO, H₂ і CH₄ в реакційній зоні, дозволяє не тільки зв'язати частину вільного кисню у відпрацьованих газах двигуна і запобігти утворенню оксидів азоту, але й провести нейтралізацію оксиду азоту і оксиду вуглецю, шляхом їх прямої взаємодії (наприклад, реакція 7).



Подальша нейтралізація відпрацьованих газів двигуна здійснюється в топці котла-утилізатора (КУ), де в суміші з повітрям, вони використовуються як окиснювач вихідного палива котла і зв'язування вільного кисню в цій суміші.

Ефективність запропонованого процесу, досліджувалася як аналітично, з використанням спеціалізованих комп'ютерних програм енергетичного спрямування [8], так і експериментально, на спеціальній лабораторній установці.

Так, в таблиці 2 наведено розрахункові дані ефективності знешкодження оксидів азоту в запропонованій когенераційній установці, де як окиснювач вихідного палива котла, використовують суміш відпрацьованих газів двигуна з повітрям.

Згідно даних, приведених в таблиці 2, лише зменшення вмісту кисню в паливно-повітряній суміші на 4.6% дозволяє зменшити емісію діоксиду азоту на 30% і скоротити витрати палива котла, на 2.2%.

Реалізація термохімічного процесу нейтралізації відпрацьованих газів двигуна в запропонованій установці здійснюється за рахунок теплоти відпрацьованих газів ГПД та теплоти екзотермічних реакцій, що проходять в шарі розжареного вуглецевого матеріалу. При недостатці цієї енергії, в пристрій додатково подається природний газ, який піддається частковій конверсії (реакції 3, 4).

На рис.3 наведено графіки кількості теплоти, яка необхідна для догрівання відпрацьованих газів, до визначеної температури нейтралізації.

Таблиця 2. Емісія діоксиду азоту і економія палива котла когенераційної установки, при використанні в ролі окиснювача палива суміші відпрацьованих газів ГПД і повітря

Температура суміші, К	Вміст кисню в суміші, %	Економія палива котла, %	Емісія діоксиду азоту, мг/м ³
318.5	20.39	0.57	1084
322.3	19.81	0.73	962
329	18.73	1.06	748
341.3	16.89	1.72	472
346.4	16.09	2.05	382
348.4	15.77	2.19	349

Експериментальна установка і результати досліджень. Ефективність даного способу знешкодження CO і NO_x досліджувалася на експериментальній лабораторній установці, схему якої представлено на рис.4.

Установка дозволяла, в широкому діапазоні температур (500...1000°C) моделювати, як продукти згоряння природного газу (який є базовим паливом для ГПД і ГТУ), з визначеним коефіцієнтом надлишку повітря (кисню), так і концентрацію CO та NO_x в їх складі.

Першочерговою задачею дослідження, було визначення впливу температури на нейтралізацію оксидів азоту в продуктах згоряння природного газу. Для прикладу, на рис.5 наведено результати досліджень впливу температури (в діапазоні 750...950°C), на процес термохімічного знешкодження оксидів азоту (NO_x) і оксиду вуглецю (CO).

В результаті проведених досліджень встановлено, що в діапазоні температур 750... 950°C, концентрація оксидів азоту зменшується в 2.5...3 рази, а концентрація оксиду вуглецю майже в 5 разів. При цьому, ефективність нейтралізації NO_x, в діапазоні розглянутих температур, змінюється не суттєво (в межах 10 %), що дозволяє проводити процес нейтралізації при температурі 750...780°C і менших енергетичних витратах.

На рис.6 наведено графіки знешкодження оксидів азоту NO_x і оксиду вуглецю CO при фіксованій температурі (820°C) та різній початковій концентрації NO, в продуктах згоряння природного газу. Можна припустити, що суттєве зниження концентрації CO є наслідком його вигорання та прямої участі в нейтралізації оксидів азоту, що є черговим доказом ефективності процесу.

Результати проведених досліджень, дають можливість зробити висновок про ефективність запропонованого способу нейтралізації шкідливих компонентів відпрацьованих газів ДВЗ, починаючи вже з нижнього значення розглянутих температур (750...780 °C), що зменшує теплові витрати на проведення самого процесу.

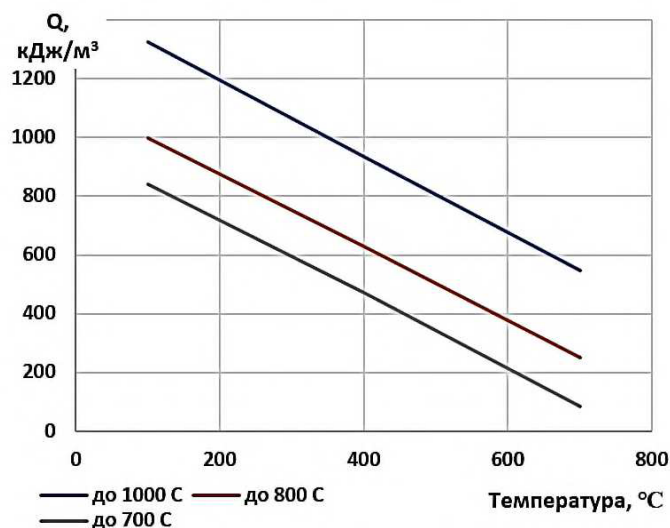


Рис. 3. Кількість теплоти, яка необхідна для догрівання відпрацьованих газів двигуна (T_{BF}) до визначеної температури їх нейтралізації

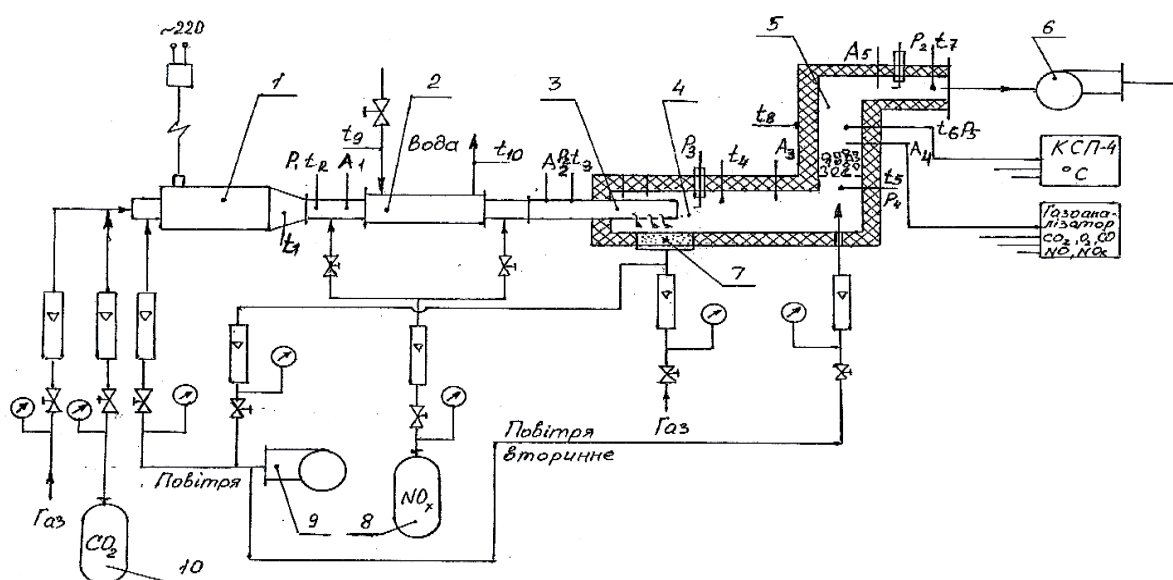


Рис. 4. Схема лабораторної експериментальної установки для дослідження термохімічного методу знешкодження CO і NO_x у продуктах згоряння природного газу:

- 1 – паливник допоміжний; 2 – холодильник; 3 – колектор продуктів згоряння; 4 – камера змішування;
 5 – камера допалювання; 6 – димосос; 7 – паливник; 8 – балон NO_x ; 9 – вентилятор;
 10 – балон CO; t – точки вимірювання температури; p – точки вимірювання тиску;
 A – точки відбору проб газу

Подальші експериментальні дослідження, в напрямі визначення оптимальних концентрацій CO, H_2 і CH_4 , і їх індивідуального впливу на процес нейтралізації шкідливих компонентів, дозволять оптимізувати процес та отримати вихідні дані для конструювання когенераційної установки з високими економічними і екологічними характеристиками.

Використання у термохімічному пристрої твердого палива і його газифікації, дозволяє не тільки знешкодити шкідливі компоненти відпрацьованих газів двигуна, але й забезпечити часткове заміщення природного газу в ГПД, ГТУ та котлі-утилізаторі. Це дозволить розширити номенклатуру використовуваних палив і за-

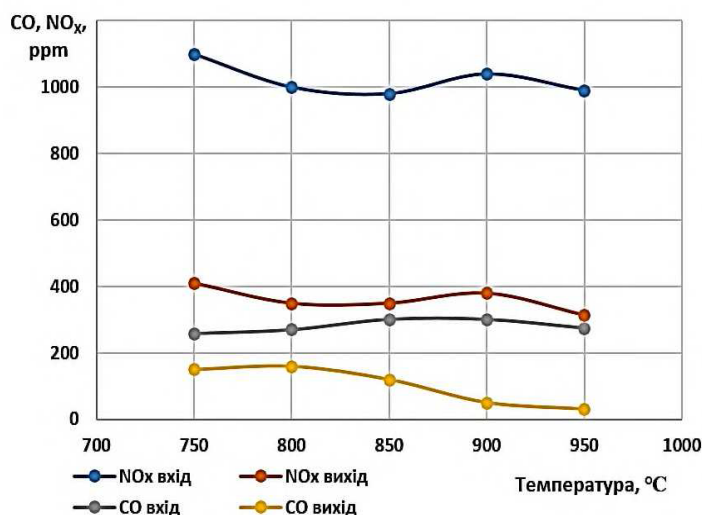


Рис. 5. Вплив температури на процес термохімічного знешкодження оксидів азоту (NO_x) і оксиду вуглецю (CO)

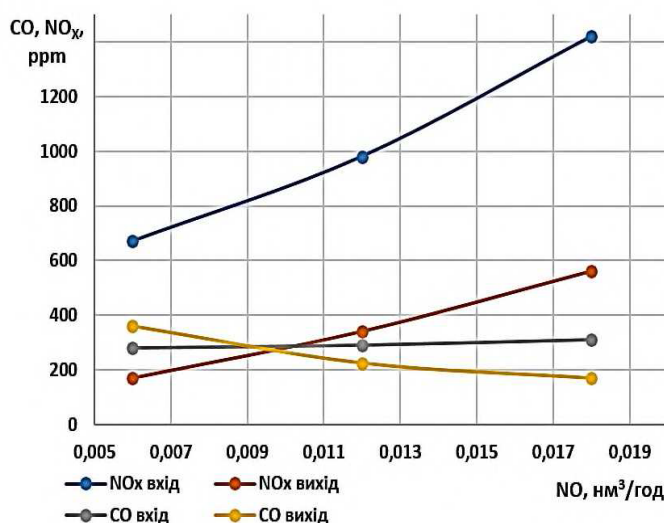


Рис. 6. Термохімічне (820°C) знешкодження оксидів азоту NO_x і оксиду вуглецю CO при різній концентрації NO у вихідних продуктах згоряння природного газу

безпечити економію традиційних викопних палив, при відповідному зменшенні теплових і шкідливих викидів котла у довкілля.

Висновки

1. Використання термохімічних пристроїв в когенераційних установках на базі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), газопоршневих (ГПД) і газотурбінних установок (ГТУ) дозволяє суттєво покращити їх економічні і екологічні характеристики, зокрема, зменшити концентрації оксидів азоту і оксиду вуглецю, у їх відпрацьованих газах, в 2.5...3 рази.

2. Ефективність термохімічного пристрою, в діапазоні розглянутих температур ($750\ldots 950^\circ\text{C}$), по нейтралізації NO_x , змінюється не суттєво (в межах 10 %), що дозволяє зробити висновок про стабільну ефективність процесу, та можливість його ведення при температурі $750\ldots 780^\circ\text{C}$.

3. Розміщення термохімічного пристрою перед котлом–утилізатором, з однієї сторони, змінює теплові характеристики когенераційної установки в сторону підвищення її теплових навантажень, а з іншої, підвищує маневрені можливості установки, забезпечуючи можливість незалежної зміни електричного і теплового навантаження.

4. Використання у термохімічному пристрої твердо-го палива і його газифікації, дозволяє не тільки знешкодити шкідливі компоненти відпрацьованих газів двигуна, але й забезпечити часткове заміщення природного газу в двигуні та котлі–утилізаторі, при відповідному зменшенні теплових і шкідливих викидів у довкілля.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Долінський А.* Когенерація — нові потужності для енергетики / А. Долінський, В. Клименко // Вісник Національної академії наук України. - 2002. - № 4.- С. 26-32. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnapu_2002_4_4

2. *Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И.* и др. Двигатели внутреннего сгорания // Теория поршневых и комбинированных двигателей. — М.: Машиностроение, 1988. — 372 с.

3. *Терентьев Г.А.* и др. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А.Терентьев, В.М.Тюков, Ф.В.Смаль —М.: Химия, 1989. — 272 с.

4. *Говорущенко Н.Я.* Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. — М.: Транспорт, 1990. — 135 с.

5. Кузнецов И.Е. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий / И.Е.Кузнецов, Т.М.Троицкая. — М.: Химия, 1979. — 344 с.

6. *Билека Б.Д., Кабков В.Я., Скляренко Е.В., Погожев В.Н.* Пути улучшения тепловых и экологических характеристик когенерационных установок с приводом от газотурбинных и газопоршневых двигателей// Б.Д. Билека, В.Я.Кабков, Е.В.Скляренко, В.Н.Погожев/ Авиационно — космическая техника и технология. — 2011. - №10 (87). — С.34 -37.

7. *Перелетов И.И., Бровкин Л.А., Розенгарт Ю.И.* и др.; Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: Учеб. Для вузов /И.И. Перелетов, Л.А.Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.; Под редакцией А.Д.Клочникова. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 336 с.

8. *Котлер В.Р.* и др. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций/ В.Р.Котлер и др. — М.: Химия, 1979. — 344 с.

THE IMPROVEMENT OF THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF COGENERATION PLANTS BASED ON HEAT ENGINES WITH THE THERMOCHEMICAL METHOD OF CLEANING THEIR EXHAUST GASES

Bileka B.D.¹, Sklyarenko E.V.²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Marii Kapnist str, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

¹Dr. Sci. (Engin.), borbi1937@gmail.com.

²PhD (Engin.), SklyarenkoEV@Nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3952-6520>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.11>

The article presents the results of research aimed at improving the economic and environmental characteristics of cogeneration plants based on heat engines (ICE, GPE, GTU), with a thermochemical device for the neutralization of harmful components of its waste gases, and a boiler-utilizer (BU). The neutralization process takes place in a layer of red-hot carbon material and a gaseous medium, which includes: methane, hydrogen and carbon monoxide.

The effectiveness of the proposed process was investigated both analytically, using specialized computer programs for energy management, and experimentally, by a special laboratory device, which made it possible to simulate in a wide range of temperatures (500...1000°C) how the products of natural gas combustion (the base fuel for the GPA and GTU), with a defined coefficient of excess air (oxygen), as well as the concentration of CO and NOx in their composition.

The primary task of the experimental study was to determine the effect of temperature on the neutralization of nitrogen oxides and carbon monoxide in natural gas combustion products. The results of the studies (in the considered temperature range of 750...950°C) showed the possibility of reducing the concentration of nitrogen oxides by 2.5...3 times, and the concentration of carbon monoxide by almost 5 times. At the same time, it was established that the efficiency of NOx neutralization at the considered temperature range does not change significantly (within 10%), which makes it possible to carry out the neutralization process at a temperature of 750...780°C and reduce the energy cost.

The final neutralization of the exhaust gases of the engine and the utilization of their thermal potential is carried out in the boiler-utilizer. The placement of the thermochemical device in front of the boiler-utilizer, on the one hand, changes the thermal characteristics of the cogeneration plant to direction of increasing its heat loads, and on the other hand, increases the maneuverability of the plant, providing possibility of independent change of electrical and thermal load. In addition, the use of solid fuel with its gasification in the device allows not only to neutralize the harmful components of the engine's exhaust gases, but also to provide a partial replacement of natural gas in the engine and the boiler - utilizer with a corresponding reduction of thermal and harmful emissions in to the environment.

References 8, figures 6, table 2.

Key words: cogeneration, thermochemical conversion, neutralization of harmful emissions

1. Dolinskyi A., Klymenko V. Koheneratsiia Novi potuzhnosti dlia enerhetyky. [Cogeneration new capacities for energy]. Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. 2002. № 4. P. 26-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2002_4_4 (in Uk.r)
2. Vyubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. et al. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]. Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley. M.: Mashinostroenie, 1988. 372 p (in Rus.).
3. Terentev G.A. Tyukov V.M., Smal F.V. Motornyie topliva iz alternativnykh syrevykh resursov [Motor fuels from alternative raw materials]. M.: Himiya, 1989. 272 p. (in Rus.).
4. Govoruschenko N.Ya. Ekonomiya topliva i snizhenie toksichnosti na avtomobilnom transporte [Saving fuel and reducing toxicity in road transport]. M.: Transport, 1990. 135 p. (in Rus.).
5. Kuznetsov I.E., Troitskaya T.M. Zashchita vozduhnogo basseyna ot zagryazneniya vrednyimi veshchestvami himicheskikh predpriyatiy [Protection of the air basin from pollution by harmful substances from chemical plants] M.: Himiya, 1979. 344 p. (in Rus.).
6. Bileka B.D., Kabkov V.Ya., Sklyarenko E.V., Pogozhev V.N. Puti uluchsheniya teplovyykh i ekologicheskikh harakteristik kogeneratsionnykh ustanovok s privodom ot gazoturbinnykh i gazoporshnevnykh dvigateley [The ways to improve the thermal and environmental characteristics of cogeneration plants driven by gas turbine and gas piston engines] Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. №10 (87). P.34 -37. (in Rus.).

7. *Pereletov I.I., Brovkin L.A., Rozengart Yu.I. et al. Vysokotemperaturnye teplotnologicheskie protsessy i ustanovki: ucheb. dlya vuzov [High-temperature thermal processes and devices: Textbook for universities] / Edited by A.D. Klochnikova. M.: Energoatomizdat, 1989. 336 p. (in Rus.).*

8. *Kotler V.R. et al. Metodicheskie ukazaniya po raschetu vyibrosov oksidov azota s dyimovymi gazami kotlov teplovyih elektrostantsiy [Guidelines for calculating emissions of nitrogen oxides from flue gases of boilers of thermal power plants]. M.: Himiya, 1979. 344 p. (in Rus.)*

Отримано 06.02.2024

Received 06.02.2024

Прийнято до друку 11.04.2024

Accepted for publication 11.04.2024

УДК 620.92

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОЧАРУ ТА ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ БІОВУГІЛЛЯ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.12>

Зроблено техніко-економічний аналіз виробництва біоچارу та біовугілля з гранульованого та негранульованого лушпиння соняшника на технологічній лінії продуктивністю 5 т/год по вхідній сировині. Наведено основні характеристики обладнання різних виробників, вимоги до якості біоچارу, зроблено короткий огляд ринку біоچارу та супутніх продуктів його виробництва. Визначено основні ризики впровадження проєктів виробництва біоچارу в Україні та можливості їм запобігти.

An analysis was conducted on the technical and economic aspects of producing biochar and charcoal from both granulated and non-granulated sunflower husks on a technological line with an input productivity of 5 t/h. The information provided on the main characteristics of equipment from various manufacturers, biochar quality requirements, a brief overview of the biochar market and related products of its production. The main risks of implementing biochar production in Ukraine and the possibilities to prevent them have been outlined.

Бібл. 13, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: виробництво біоچارу, біовугілля, піроліз, газифікація.

Актуальність роботи полягає у пошуку нових можливостей виробництва продуктів з більшою доданою вартістю шляхом переробки відходів та залишків біомаси в Україні.

Метою даної роботи є техніко-економічний аналіз ефективності виробництва біоچارу на основі найбільш доступних технічних рішень, пропонованих постачальниками відповідних технологій та обладнання.

Методи дослідження включають аналіз наукових та інших публікацій, збір технічних та цінових пропозицій виробників обладнання, проведення техніко-економічних розрахунків.

Результати дослідження

Під біовугіллям будемо розуміти коксозольний залишок, що утворюється в результаті термохімічної конверсії (перетворення) біомаси. В англійській науковій літературі розрізняють такі види біовугілля:

- біовугілля ("charcoal")- чорна аморфна форма вуглецю, отримана шляхом нагрівання деревини або інших органічних речовин за відсутності повітря, що використовується як паливо, при виплавці металевих руд, у вибухових речовинах і як сорбент.

- біочар ("biochar")- пористий вуглевмісний матеріал, який виробляється шляхом піролізу біомаси та використовується як біодобриво або поліпшувач ґрунту, для довгострокового поглинання вуглецю або заміщення

викопного вуглецю у промисловому виробництві. Він не передбачений для виробництва енергії [2].

- торефікована біомаса ("torrefied biomass") – біомаса, що оброблена в процесі торефікації.

Основними технологіями, що призводять до утворення біовугілля, є торефікація, піроліз та газифікація (Рис. 1).

Результатом всіх цих процесів є збільшення вмісту вуглецю в продукті. Під час термохімічної обробки біомаси, що супроводжується її розкладанням, торефікація зазвичай є першою стадією, за якою йде піроліз і, нарешті, газифікація. По мірі виходу летких речовин, хімічний склад біомаси змінюється – зменшується вміст водню і кисню, в результаті падають молярні співвідношення Н/С та О/С, що є показником інтенсивності карбонізації [3].

Біочар фактично являє собою вуглецевий залишок, що утворюється в усіх процесах, перелічених вище. Різнитися, крім різної технологічної направленості щодо отримання цільового продукту, полягає в різній кількості отриманого вуглецевого залишку – Табл. 1. Повільний піроліз вважається найкращою технологією для виробництва біоچارу, що дозволяє отримати більший його вихід [4].

Загалом біочар має високу сорбційну здатність, велику питому поверхню, мікропористість та іонообмінну здатність, тому його можна застосовувати як каталізатор,

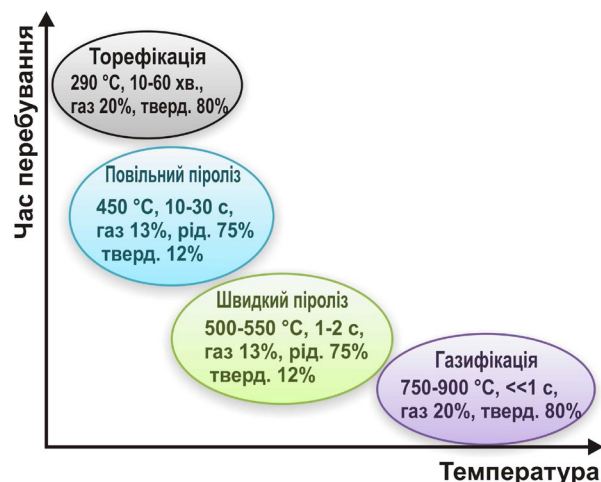


Рис. 1. Різні режими термохімічної обробки (карбонізації) біомаси в залежності від температури та часу перебування (на основі [1])

Таблиця 1. Залежність ефективності відгонки аміаку від температури, об'єму доданого у воду повітря та рН ДСВ

Техніка	Температура (°C)	Час перебування (с)	Швидкість нагріву (°C/с)	Біочар (%)	Біо-олія (%)	Синтез-газ (%)
Повільний піроліз	300-550	від годин до днів	1-10	35	30	35
Проміжний піроліз	450-550	10-20 с	10-1000	25	50	25
Швидкий піроліз	450-600	<2 с	10-1000	12	75	13
Газифікація	> 800	10-20 с	1-0,8	10	5	85
Торефікація	450-550	< 2 год	-	75	20	5
Гідротермічна карбонізація	< 200	1-16 год	<1	35	30	35

очишувач стічних вод, для компостування, зберігання енергії, секвестрації вуглецю та покращення ґрунту, а також як добавку в раціон тварин.

Встановлено, що для підвищення врожайності біочар є ефективним у поєднанні з неорганічними добривами. Він сприяє збільшенню мікробіоти, каталізує ґрунтові процеси, поліпшує структуру поверхневого шару ґрунту та його водопроникність. Завдяки застосуванню біочару можна зменшувати загальну норму внесення добрив на 30–50 %, оскільки він сприяє переведенню поживних речовин у доступну для рослин форму, накопичує їх та вивільнює для рослин тоді, коли вони цього найбільше потребують [5].

Проте, біочар в Україні поки вивчено недостатньо, ефективність його використання в наших умовах потребує подальших досліджень [5]. На ринку препаратів для внесення в ґрунт в Україні біочар (можливо, поки) не набув достатнього розповсюдження. Тому пріоритетною метою його виробництва можна вважати експорт, принаймні доти, поки не з'явиться його ринок в Україні.

З огляду на це, важливо розуміти, яким вимогам має відповідати біочар. Застосування біочару є відносно новим, і в ЄС щодо нього поки немає спеціального законодавчого регулювання. В Україні також поки немає стандарту на біочар, і він не внесений до Державного реєстру пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні.

Основні добровільні стандарти на біочар розроблені такими організаціями як International Biochar Initiative (IBI) та European Biochar Certificate (EBC). Деякі важливі вимоги щодо якісних характеристик показано в Табл. 2.

У світі протягом останнього десятиліття популярність біочару зростала. Основним рушієм ринку біочару є можливість його застосування як засобу захоронення вуглецю, тобто виведення його з природного кругообігу на тривалий час, що є одним із способів запобігання утворенню парникових газів. Біочар розглядається Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) як одне з можливих кліматичних рішень для досягнення нульових

Табл. 2. Критерії якості ІВІ та ЕВС (вибірково) [3]

Параметр	Одиниці виміру	ЕВС базовий	Преміум ЕВС	ІВІ
Вуглець	вага%	>50	>50	Клас 1: >60; Клас 2: >30; Клас 3: >10
Н/С	моль/моль	<0,7	<0,7	<0,7
О/С	моль/моль	<0,4	<0,4	н/д
Порогові значення забруднюючих речовин:				
Миш'як	мг/кг	13	13	13-100
Свинець	мг/кг	150	120	121-300
Кадмій	мг/кг	1,5	1	1,4-39
Хром	мг/кг	90	80	93-1200
Кобальт	мг/кг	-	-	34-100
Мідь	мг/кг	100	100	143-6000
Молібден	мг/кг	-	-	5-75
Нікель	мг/кг	50	30	47-420
Меркурій	мг/кг	1	1	1-17
Селен	мг/кг	-	-	2-200
Цинк	мг/кг	400	400	416-7400
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (сума 16 пріоритетних забруднювачів)	мг/кг	12	4	6-300
Поліхлоровані біфеніли	мг/кг	0,2	0,2	0,2-1
Діоксини (I-TEQ OMS)	нг/кг	20	20	17
Фурані (I-TEQ OMS)	нг/кг	20	20	17

викидів парникових газів. Таким чином, використання біочару як поліпшувача ґрунту створює можливості для агрокомпаній зменшувати свій «вуглецевий слід» [6].

Коротка характеристика основних ринків біочару [7]:

- Китай: виробництво 300-500 тис. тонн на рік, продовжує стрімко зростати;
- США: виробництво близько 50 тис. тонн на рік, продовжує зростати;
- Європа: виробництво близько 20 тис. тонн на рік, продовжує зростати;
- Австралія: виробництво близько 5 тис. тонн на рік, продовжує зростати.

В Європі з 2012 року кількість виробників біочару стрімко зростала. Лише у 2021 році було введено в експлуатацію 25 нових виробництв, завдяки чому загальна кількість заводів перевищила 100, а виробнича потужність – 35 тис. тонн, що свідчить про швидке становлення індустрії біочару. Наразі у європейському виробництві біочару домінують Німеччина, Австрія, Швейцарія та скандинавські країни (переважно Швеція),

на які припадає понад 75% ринку. Інші країни, такі як Іспанія, також розвивають цей ринок [8].

Дослідження ринку свідчить про значні ринкові можливості для біочару в Україні. Виходячи з наявної сировини, річний розмір пропозиції та попиту оцінюється відповідно у понад 8,5 та понад 40 млн тонн [6].

Світові ціни біочару як поліпшувача ґрунту коливаються в межах від 200 до 2000 євро/т, а як кормової добавки – в діапазоні від 1200 до 1750 євро/т (в біг-бегах). Однак для менших упаковок ціна може сягати до 5500 євро/т. Середня світова ціна на біочар становить 800 євро/т [7]. Попередній аналіз цін показує, що біочар має найбільшу ринкову ціну на одиницю маси, порівняно з торефікованою біомасою чи деревним вугіллям. Ціна пелет з торефікованої біомаси становить 150-250 \$/т [9]. Ціни на деревне вугілля становлять 100-600 \$/т, з максимальними цінами до 900 \$/т.

Таким чином, з перелічених видів біовугілля, біочар можна розглядати як пріоритетний продукт для впровадження його виробництва, особливо враховуючи те,

що сучасні технології та апаратурне оформлення виробництва всіх перелічених вище видів біовугілля доволі схожі.

Успіх комерційного виробництва біочару залежить від потенціалу корисного застосування супутніх продуктів. Основні можливості утилізації продуктів піролізу біомаси включають виробництво теплової та електричної енергії, виробництво дизельного пального та бензину, а також синтез метанолу, паливного етанолу та аміаку [10].

Властивості продуктів піролізу значною мірою залежать від сировини та умов проведення процесу. Біооцтова кислота (“деревний оцет”) отриманий шляхом повільного піролізу – це рідка фракція, що містить такий набір речовин, як органічні кислоти, кетони, альдегіди, спирти, бензол та його похідні, гетероциклічні сполуки, феноли та їх похідні, алкілфенілові ефіри, похідні

вуглеводів та сполуки азоту [11]. Деревний оцет виробляють і комерційно використовують у Китаї, Індонезії, Малайзії, Бразилії та Чилі. Очікується, що ринок деревного оцту у вартісному вираженні досягне близько 6 мільйонів доларів США до 2024 року при загальних річних темпах зростання 7,6% з 2016 по 2024 рік. Європейський ринок деревного оцту невеликий (за оцінками, приблизно від 1 до 1,5 млн доларів на рік). Поточна оптова ціна деревного оцту на азійському ринку становить близько 4 доларів США за галон, що відповідає ціні 900 євро/т.

Техніко-економічне обґрунтування виробництва біочару було розроблене для одного з українських заводів по виробництву рослинних олій (соняшникової та ріпакової), де соняшникове лушпиння використовують як джерело теплової енергії для виробничих потреб, а його надлишок в обсязі 40-65 тис. тонн на рік грану-

Табл. 3. Прогнозний вихід біочару та інших компонентів. Технології та обладнання

Компанія, країна	Технологія	Тип конструкції обладнання	Вихід біочару, %	Інші компоненти, %
Beston Group, Китай	Повільний піроліз, температура 200-300 °С, тривалість обробки 15-25 хвилин	Барабанного типу	28-30%	синтез-газ- 60-62%; деревний оцет- 8%; смола- 2%
Henan Mingjie, Китай	те ж	те ж	25-35%	синтез-газ-53-69%; деревний оцет + смола- 6-12%
Biomason, Німеччина	Піроліз, температура в камері до 900 °С	Піролізний котел з вбудованим шнековим піролізером	21,7%	н/д
Nettenergy, Нідерланди	Піроліз, температура в камері вище 700 °С	Піро-газифікатор з очищенням сингазу та виробництвом електроенергії	10-15%	синтез-газ- 85-90%
PYREG, Німеччина	Газифікація, діапазон температур 500-750 °С з обмеженим доступом кисню	Шнекового типу	24%	синтез-газ-76%
Baoyuan Machinery, Китай	Газифікація, діапазон температур 700-800 °С з обмеженим доступом кисню	Барабанного типу	33%-при виробництві біочару; 25% - при виробництві біовугілля	синтез-газ+деревний оцет + смола- 67-75%
Carbofex, Фінляндія	Піроліз	н/д	20-30%	синтез-газ+деревний оцет + смола- 70-80%
HaiQi, Китай	Піроліз, температура в камері 500-800 °С	Шнекового типу	20-25%	синтез-газ+деревний оцет + смола- 75-80%

люють та реалізують на ринку, але його також можна використати як сировину для виробництва біочару. Подальший аналіз базується на технічних та цінових пропозиціях виробничого обладнання, отриманих від компаній, що погодилися їх надати. В Табл. 3 показано основні типи пропонованих технологій та конструкцій обладнання для виробництва біочару.

Частина компаній пропонують реактори барабанного типу, де переміщення біомаси всередині барабана відбувається при його обертанні та взаємодії з внутрішніми лопатями. Інша частина компаній пропонують варіант, де біомаса переміщується за допомогою шнека. Практично в усіх варіантах відбувається опосередкований нагрів біомаси через стінку – у варіанті як зі шнеком, так і з барабаном, що обертається, камера, де знаходиться біомаса, відокремлена стінкою від зовнішньої камери, куди подаються димові гази з камери згоряння, в якій спалюється синтез-газ. В більшості варіантів використано піроліз, при якому утворюється синтез-газ, а також «деревний оцет». Також при піролізі в певній кількості може утворюватись смола ("tar oil"), що є складною сумішшю фенолів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) і гетероциклічних сполук. Практично всі виробники обладнання вимагають застосування сухої сировини, вологістю до 12%. Для більш вологої сировини пропонується попереднє висушування.

Соняшникове лушпиння може бути застосоване як у формі гранул, так і негранульоване. Використання гранульованого лушпиння має певні переваги: зменшення пилоутворення в процесі транспортування та обробки, хорошу заповнюваність об'єму реактора, отримання біочару також у формі гранул, хоча і менш щільних та дещо зменшеного розміру. Така форма є прийнятною для споживачів біочару та дозволяє пакувати його в тару без додаткового ущільнення (гранулювання чи брикетування). Натомість перевагою використання негранульованого лушпиння є відсутність витрат на його гранулювання, хоча отриманий біочар для зручності перевезення, все ж може потребувати ущільнення (наприклад, брикетування). Крім того, більш дрібний фракційний склад сировини може зменшувати масовий відсоток виходу біочару.

Соняшникове лушпиння не потребує подрібнення, а також є доволі сухим (вологість до 11%), тому не потребує попереднього висушування.

Аналіз літературних джерел [12] свідчить, що вихід біочару суттєво залежить від вмісту лігніну в сировині: біомаса з вищим вмістом лігніну та меншим вмістом целюлози може мати більший вихід біочару. Вміст лігніну

в лушпинні соняшнику досить низький, порівняно з деревиною – за нашою оцінкою, на рівні 22%, що створює ризик меншого виходу біочару.

Щодо енергетичного балансу, в усіх пропонованих варіантах технічних рішень процес виробництва біочару не потребує додаткового використання іншого палива, крім продуктів піролізу чи газифікації, за виключенням початку процесу, коли треба використання палива, рідкого чи газоподібного, для прогріву обладнання та запуску процесу термічного розкладу сировини. Після виходу обладнання на робочий режим, реактор починає опалюватись продуктами розкладу, а саме синтез-газом. В процесі піролізу намагаються отримати стільки синтез-газу, щоб його вистачило для опалення реактора. Решта речовин – деревний оцет та смола, виводяться з виробничого циклу та розглядаються як корисні продукти. Попереднє висушування сировини (за необхідності) проводять в окремій сушарці за допомогою димових газів. У варіантах, що передбачають газифікацію, вихід біочару суттєво менший, ніж при піролізі, а продуктів газифікації (синтез-газу) вистачає не тільки для підтримання процесу, але і для отримання додаткової теплової енергії, яку можна застосувати для опалення, сушіння чи виробництва електричної енергії.

В Табл. 4 наведено оцінку продуктивності та капітальних витрат впровадження виробництва біочару за різними варіантами.

З наведених даних видно, що максимальна виробнича потужність по переробці сировини становить 5 т/год, з продуктивністю по виробництву біочару 1,5 т/год. Найбільшу продуктивність мають варіанти піролізу, що пропонуються китайськими постачальниками.

За базовий варіант для техніко-економічної оцінки було прийнято пропозицію китайської компанії Beston Group [13], продуктивністю по сировині 5 т/год. Враховуючи рекомендації компанії HaiQi, що має досвід переробки лушпиння соняшника, було прийнято вихід біочару на рівні 24% до маси перероблюваної сировини. Тоді річна переробка лушпиння в цьому варіанті становитиме близько 28 тис. тонн на рік, а виробництво біочару, відповідно, близько 6,8 тис. тонн на рік.

Технологічну схему виробництва біочару зображено на Рис. 2.

Також для базового варіанту техніко-економічної оцінки було прийнято, що для переробки використовується лушпиння соняшника у вигляді гранул.

Обладнання компанії Beston Group розраховане на безперервну експлуатацію протягом 5 діб (24 години на добу), наступні 2 доби необхідні для проведення регла-

ментних робіт з очищення обладнання, змащування та заміни розхідних елементів. Тому коефіцієнт використання встановленої виробничої потужності лінії становить 71%. При цьому, заплановано цілодобову роботу в ті дні, коли не проводяться регламентні роботи.

Загалом, китайські виробники відзначають необхідність частих планових зупинок свого обладнання, в той час як європейські виробники говорять про можливість практично безперервної роботи їх обладнання та зупинку на обслуговування лише в той час, коли, наприклад, сам завод з виробництва рослинної олії зупиняється на обслуговування (1 місяць).

Капітальні витрати проекту виробництва біочару у вибраному варіанті, з урахуванням додаткового обладнання та будівель (бункери, транспортери, газоходи, димова труба, виробниче приміщення, автотранспортувач) становить 879 тис. євро (35,2 млн грн).

Питомі витрати електричної енергії безпосередньо обладнання компанії Beston Group становить 122 кВт (близько 153 кВт з урахуванням додаткового обладнання). Виробничий процес потребує воду для охолодження, з питомою витратою 0,125 м³/год. Також треба враховувати витрату природного газу на прогрів обладнання та вихід на робочий режим (120-140 м³/год протягом двох годин), що відбуватиметься через кожні

5 днів. Вартість технічного обслуговування свого обладнання представники компанії Beston Group оцінюють у 85 \$/добу.

Вартість сировини для виробництва біочару було враховано як середню ціну продажу гранул з лущиння соняшнику (90 євро/т без ПДВ). Розрахунки собівартості біочару та вартості доставки склали 603,4 євро/т (в тому числі середня вартість доставки до країн Західної Європи чи Скандинавії – 116,8 євро/т). Тобто, за ціни збуту, меншої за 603,4 євро/т, проект не може бути окупним. Основними статтями витрат є сировина (64,7%) та доставка продукції на експорт (19,4%), що в сумі становить 507,3 євро/т. Отже, інші виробничі витрати, крім вартості сировини, склали 96,1 євро/т.

Було розраховано варіанти фінансових показників за трьох рівнів цін на біочар, а також з урахуванням та без урахування продажу побічних продуктів (деревного опилу та смоли). Результати розрахунку показано в Табл. 5. Як видно з наведених результатів, проект може бути окупним навіть при низькій ціні біочару, якщо вдасться реалізовувати побічні продукти піролізу (деревний опил та смоли). При високій ціні на біочар, що насправді може вважатись середньою ціною, проект має дисконтований строк окупності менше одного року навіть без урахування збуту побічних продуктів.

Табл. 4. Дані щодо розглянутих варіантів виробництва біочару

Компанія, країна	Тип, марка	Продуктивність, т/год		Ціна (з доставкою та монтажем), євро	Побічні продукти, кВт		
		по сировині	по біочару		тепло	пара, кг/год	електроенергія
Beston Group, Китай	BST-50	5	1,4	551 606			
Biomason, Німеччина	C500-I	0,3	0,07	1 429 250	500		
Henan Mingjie, Китай	MJT-5000	5	1,5	569 711			
Nettenergy, Нідерланди	PyroGasifier	0,5	0,06	1 423 500			400
PYREG, Німеччина	PX1500	0,37	0,10	2 997 563	600	810	
Baoyuan Machinery, Китай		3	1,00	493 300			
Etia_VOW ASA, Норвегія	CHE5t	5	1,25	30 000 000	9000		
Carbofex, Фінляндія	IX Pyrolysis line	0,44	0,13	1 659 250			
HaiQi, Китай	CNBC1000	3,5	0,79	н/д			2800

Найбільша чутливість фінансових показників такого проєкту, в порядку зменшення впливу, відзначається до зміни ціни продажу біочару, виходу біочару по відношенню до маси сировини, вартості сировини та до зміни фонду робочого часу. Тож, при прийнятті рішення щодо впровадження проєкту, необхідний пошук потенційних споживачів та узгодження з ними ціни продажу біочару за відповідними контрактами.

Розглядався також варіант виробництва на тому ж технологічному обладнанні біочару з негранульованого лушпиння, вартість якого, за даними підприємства, становить 220,8 грн/т без ПДВ. Такий варіант технічно можливий. Але, при цьому немає гарантії, що обладнання буде працювати з тою ж продуктивністю переробки, оскільки можливість завантаження визначається

в об'ємних одиницях (м³/год), тому при використанні сировини з меншою насипною вагою слід уточнювати продуктивність. Також в цьому варіанті слід передбачити необхідність ущільнення кінцевого продукту для зручності його транспортування. Тому було передбачено встановлення лінії брикетування та враховано відповідні виробничі витрати. Якщо навіть прийняти, що продуктивність по переробці сировини знизиться з 5 до 2 т/год, фінансові результати кращі, ніж при використанні гранульованого лушпиння, причому окупність можлива навіть при мінімальній ціні біочару (Табл. 6).

При такому варіанті сировини може бути окупним також виробництво біовугілля (“charcoal”). Склад та принцип дії обладнання для його виробництва при-

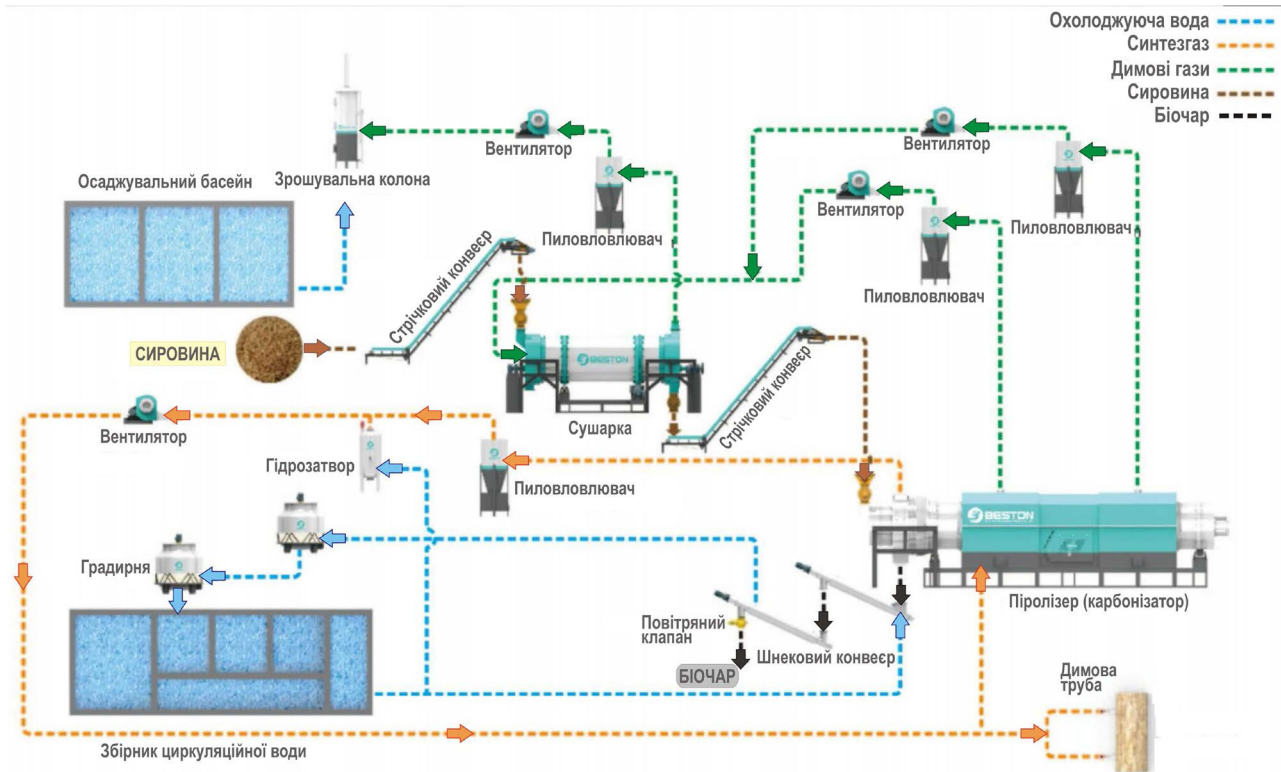


Рис. 2. Технологічна схема виробництва біочару компанії Beston Group

Табл. 5. Фінансові показники проєкту виробництва біочару з гранульованого лушпиння.

Фінансові показники	Рівень ціни на біочар, євро/т					
	450		650		800	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	-8 058	3 922	671,4	11 256,5	6 172	16 758
Внутрішня норма рентабельності (IRR), %	-	76,9%	22,9%	197,2%	113,8%	287,6%
Простий період окупності, років	немає	1,3	4,2	0,5	0,9	0,3
Дисконтований період окупності, років	немає	1,44	5,64	0,52	0,97	0,32
Примітки: 1* - без урахування реалізації побічних продуктів; 2** - з урахуванням їх реалізації.						

Табл. 6. Показники проєкту при виробництві біочару та біовугілля з негранульованого лушпиння.

Показник	Біочар			Біовугілля	
Капітальні витрати, тис. євро	864,7			864,7	
Витрата сировини, т/рік	11 545			11 545	
Виробництво, т/рік	2 661			1 663	
Варіант реалізації продукції:	на експорт			на експорт	продаж в Україні
Собівартість + доставка, євро/т	337,2			442,2	339,7
Прийнята ціна реалізації, євро/т	450,00	600,00	800,00	547,50	450,00
Фінансові показники:					
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	1 129	3 330	6 264	465	537
Внутрішня норма доходності (IRR),%	31,2%	68,2%	117,1%	19,3%	20,7%
Простий період окупності, років	3,2	1,5	0,9	4,8	4,6
Дисконтований період окупності, років	3,90	1,66	0,94	6,85	6,29

близко такий же, як і для біочару. Але, виробництво біовугілля передбачає досягнення ступеня карбонізації, що характеризується вмістом зв'язаного вуглецю вище 75% по масі, а це вимагає інших температурних режимів та зрештою призводить до зменшення виходу продукту (за нашою оцінкою, на 30-40%) порівняно з біочаром. Такий варіант також був розрахований (Табл. 6). Ціну реалізації на експорт було прийнято 547 євро/т (600 \$/т), а для реалізації в Україні - 450 євро/т. Для варіанту реалізації в Україні суттєвою економією є відсутність транспортних витрат для експорту.

Як видно, фінансові показники при виробництві біовугілля гірші, ніж при виробництві біочару, хоча, при впровадженні проєкту для реалізації біовугілля в Україні, могли би бути прийнятними. Певним резервом покращення фінансових результатів при виробництві біовугілля могло б стати використання вторинних енергетичних ресурсів у вигляді надлишкового синтез-газу, оскільки внаслідок вищого ступеня термічного розкладу сировини його утворюватиметься більше.

Висновки та рекомендації

Проведений аналіз показав, що впровадження виробництва біочару потенційно є достатньо цікавою опцією. Ринок біочару постійно зростає, як і кількість його виробників. Ціни біочару є достатньо високими, значно вищими, ніж для опцій, що передбачають паливне використання різних видів біовугілля. Середні світові ціни на біочар становлять близько 800 євро/т, максимальні - до 1800 євро/т. Причинами цього є, зокрема, «кліматична» складова, що передбачає використання біочару як засобу секвестрації вуглецю для потенційного досягнення нульового балансу викидів парникових газів.

Обладнання більшої продуктивності (до 5 т/год), наразі пропонується в основному китайськими виробниками. Обладнання європейських виробників має практично десятикратно меншу продуктивність переробки та значно вищі питомі ціни обладнання.

Собівартість виробництва біочару та його доставка для експорту до європейських країн у варіанті застосування гранульованого лушпиння склала 603,4 євро/т, та 337,2 євро/т при застосуванні негранульованого лушпиння. Для підприємств, що мають вологішу сировину (вологість вище 10%) більш крупного фракційного складу (більше 20 мм), знадобиться її висушування та подрібнення.

Фінансові показники проєкту є достатньо привабливими для впровадження.

Слід також відзначити суттєві ризики для впровадження проєкту, що полягають у невизначеності щодо ринкового попиту та можливостей збуту біочару (конкретні споживачі та рівні цін, що вони пропонують), якісних вимог до біочару та можливості розглянутого обладнання забезпечити виробництво продукції, що задовольняє цим вимогам, недостатній інформації щодо масової частки виходу біочару з різної біомасової сировини, зокрема, з лушпиння соняшника. Крім того, ступінь надійності обладнання, можливість його тривалої безаварійної роботи, а також витрати, пов'язані з його експлуатацією, наразі оцінені лише на основі даних виробників обладнання, та не мають поки практичного підтвердження.

Підприємствам, зацікавленим у реалізації такого проєкту рекомендується до початку впровадження:

1. Ознайомитись з практичним досвідом підприємств, що використовують обладнання подібного

типу та виробляють біочар, для отримання інформації щодо вартості та трудомісткості операцій з технічного обслуговування – способи та тривалість очищення, необхідність заміни швидкозношуваних деталей.

2. Зробити хімічний аналіз сировини, визначити її теплотворну здатність та провести пробну переробку партії сировини на обладнанні, яке планується до впровадження, зафіксувавши вихід біочару (в % до маси сировини) та супутніх продуктів, включаючи обсяги та, за можливості, калорійність синтез-газу.

3. Зробити аналіз отриманого біочару, зокрема, на відповідність вимогам, встановленим добровільними схемами сертифікації - International Biochar Initiative (IBI) та European Biochar Certificate (EBC).

4. Провести пошук потенційних покупців біочару (прямі споживачі чи роздрібні продавці) для обговорення якісних вимог до біочару та можливих цін його закупівлі, укладення попередніх контрактів.

Резервом подальшого покращення фінансових показників такого проекту є утилізація надлишкової теплоти процесу (за її наявності) та налагодження збуту побічних продуктів виробництва біочару (деревного опилу та смол).

Виробництво інших типів біовугілля (наприклад, charcoal) має окупність лише при застосуванні досить дешевої сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Sharifzadeh, Mahdi & Sadeqzadeh, Majid & Guo, Miao & N.Borhani, Tohid & Konda, N.V.S.N. & Cortada Garcia, Marti & Wang, Lei & Hallett, Jason & Shah, Nilay. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.006>.
2. *European Biochar Certificate (EBC)*: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf.
3. Hornung, A., Stenzel, F. & Grunwald, J. *Biochar—just a black matter is not enough*. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01284-5>.
4. Farah Amalina, Abdul Syukor Abd Razak, Santhana Krishnan, Haspin Sulaiman, A.W. Zularisam, Mohd Nasrullah, *Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications. A review*, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Volume 7, 2022, 100134, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>.

5. *Інноваційно-інвестиційний розвиток аграрної сфери – запорука продовольчої безпеки країни: доповіді учасників міжнародної науково-практичної конференції Міжнародного форуму, 26 травня 2022 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв: МНАУ, 2022. 264 с.*

6. *Market Review and Feasibility Study of Pilot Projects for a Biochar Mill in Ukraine*. NEFCO/ https://www.nefco.int/wp-content/uploads/2023/05/fut-f-completion-report_market-review-and-feasibility-study-biochar-mill-1.pdf.

7. Garcia, Bruno & Alves, Octávio & Rijo, Bruna & Lourinho, Gonçalo & Nobre, Catarina. (2022). *Biochar: Production, Applications, and Market Prospects in Portugal. Environments*. <https://doi.org/10.3390/environments9080095>.

8. Nematian, Maryam & Keske, Catherine & Ng'ombe, John. (2021). *A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. Waste Management*. 135. 467-477. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.014>.

9. Sarker, Tumpa & German, Castaneda & Borugadda, Venu & Meda, Venkatesh & Dalai, Ajay. (2023). *Techno-economic analysis of torrefied fuel pellet production from agricultural residue via integrated torrefaction and pelletization process. Heliyon*, Volume 9, Issue 6, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16359>.

10. Guida, M. Y., Rebbah, B., Anter, N., Medaghri-Alaoui, A., Rakib, E. M., & Hannioui, A. (2021). *Biofuels and biochars production from agricultural biomass wastes by thermochemical conversion technologies: Thermogravimetric analysis and pyrolysis studies. Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17(1), 15-36. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00020>.

11. Zhu, K.; Gu, S.; Liu, J.; Luo, T.; Khan, Z.; Zhang, K.; Hu, L. *Wood Vinegar As a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. Agronomy* 2021, 11, 510. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>.

12. Liu, Yanbing & Zhu, Zongyuan & Zhang, Jiaqi & Yang, Xinglin. (2021). *Simulate The Process of Preparing Biochar By Pyrolysis of Biomass Via Aspen Plus And Evaluate Its Economic*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-680405/v1>.

13. *Beston Group Co, Ltd.* <https://bestonmachinery.com/biochar-pyrolysis-equipment/>.

ECONOMIC EFFICIENCY OF THE PRODUCTION OF BIOCHAR AND SOLID FUEL BASED ON BIOCAL

Kramar V.G.

Ph.D (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.12>

Useful disposal of industrial waste and biomass remains is increasingly relevant for Ukrainian enterprises. The purpose of this article is to find additional opportunities for the production of products with greater added value by processing waste and biomass residues to biochar. World prices for biochar are quite high, much higher than for the use of biocoals as fuel, and are around 800 EUR/t, maximum up to 1,800 EUR/t.

The main technical characteristics and price offers of equipment for the production of biochar from nine manufacturers from China, Germany, Finland, Norway and the Netherlands were analyzed. The results of feasibility study of the biochar production from sunflower husks on a technological line with an input productivity of 5 t/h for one of the Ukrainian vegetable oils production plants are presented. As the main equipment, a drum-type pyrolyzer heated by synthesis gas, formed during the thermochemical decomposition of biomass, was considered. Byproducts of production are also bioacetic acid and tar oil.

The financial indicators in the case of biochar export are attractive enough for implementation. The estimated simple payback period when using granulated husk was about 4 years at a price of biochar of 650 EUR/t and less than one year at a price of 800 EUR/t. When using non-granulated husk, the simple payback period was about 3 years, even at the price of biochar of 450 EUR/t.

Possible risks for implementation are the uncertainty regarding market demand and sales opportunities for biochar, quality requirements and the ability of the considered equipment to provide them, insufficient information regarding biochar yield from various biomass, as well as the lack of experience. Enterprises interested in the implementation of such a project are recommended to conduct trial processing of a batch of their raw materials on similar equipment in advance, to determine the share of biochar yield and its quality characteristics, to search for potential buyers to discuss quality requirements and possible prices.

References 13, table 6, figure 2.

Key words: production of biochar, biocoal, pyrolysis, gasification.

1. Sharifzadeh, Mahdi & Sadeqzadeh, Majid & Guo, Miao & N.Borhani, Tohid & Konda, N.V.S.N. & Cortada Garcia, Marti & Wang, Lei & Hallett, Jason & Shah, Nilay. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. Progress in Energy and Combustion Science. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.006>.
2. European Biochar Certificate (EBC): https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf.
3. Hornung, A., Stenzel, F. & Grunwald, J. Biochar—just a black matter is not enough. Biomass Conv. Bioref. (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01284-5>.
4. Farah Amalina, Abdul Syukor Abd Razak, Santhana Krishnan, Haspin Sulaiman, A.W. Zularisam, Mohd Nasrullah, Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications. A review, Journal of Hazardous Materials Advances, Volume 7, 2022, 100134, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>.
5. Innovatsiino-investytsiyni rozvytok ahrarnoi sfery – zaporuka prodovolchoi bezpeky krainy: dopovidi uchasnykiv mizhnarodnoi naukovoopraktychnoi konferentsii Mizhnarodnoho forumu, 26 travnia 2022 r.,m. Mykolaiv [Innovative and investment development of the agrarian sphere - the guarantee of the country's food security: reports of the participants of the international scientific and practical conference of the International Forum, May 26, 2022, Mykolaiv] / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy; Mykolaivskiy natsionalnyi ahrarnyi universytet. Mykolaiv: MNAU, 2022. 264 s. (in Ukr.).
6. Market Review and Feasibility Study of Pilot Projects for a Biochar Mill in Ukraine. NEFCO/ https://www.nefco.int/wp-content/uploads/2023/05/futf-completion-report_market-review-and-feasibility-study-biochar-mill-1.pdf.
7. Garcia, Bruno & Alves, Octávio & Rijo, Bruna & Lourinho, Gonçalo & Nobre, Catarina. (2022). Biochar: Production, Applications, and Market Prospects in Portugal. Environments. <https://doi.org/10.3390/environments9080095>.
8. Nematian, Maryam & Keske, Catherine & Ng'ombe, John. (2021). A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. Waste Management. 135. 467-477. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.014>.
9. Sarker, Tumpa & German, Castaneda & Borugadda, Venu & Meda, Venkatesh & Dalai, Ajay. (2023). Techno-economic analysis of torrefied fuel pellet production from agricultural residue via integrated torrefaction and pelletization process. Heliyon, Volume 9, Issue 6, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16359>.

10. Guida, M. Y., Rebbah, B., Anter, N., Medaghri-Alaoui, A., Rakib, E. M., & Hannioui, A. (2021). Biofuels and biochars production from agricultural biomass wastes by thermochemical conversion technologies: Thermogravimetric analysis and pyrolysis studies. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17(1), 15-36. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00020>.
11. Zhu, K.; Gu, S.; Liu, J.; Luo, T.; Khan, Z.; Zhang, K.; Hu, L. Wood Vinegar As a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. *Agronomy* 2021, 11, 510. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>.
12. Liu, Yanbing & Zhu, Zongyuan & Zhang, Jiaqi & Yang, Xinglin. (2021). Simulate The Process of Preparing Biochar By Pyrolysis of Biomass Via Aspen Plus And Evaluate Its Economic. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-680405/v1>.
13. Beston Group Co, Ltd. <https://bestonmachinery.com/biochar-pyrolysis-equipment/>.

Отримано 16.01.2024

Received 16.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024