

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 47, № 1, 2025

Головний редактор – **Сисєжкін 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.
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

Вітаємо ювіляра: членкині-кореспондентці
НАН України Н.М.Фіалко 75 років.....5

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

**Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Жученко І.М.,
Шевчук С.І., Гнедаш Г.О.**

Проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних
трактів установок спалювання твердих побутових
відходів та шляхи їх вирішення7

**Авраменко А.О., Тирінов А.І., Ковецька Ю.Ю.,
Анастасьєв Д.В.**

Вплив турбулентності потоку на процеси детонації ..19

Петрова Ж.О., Граков Д.П.

Тепломасообмінні процеси під час одержання
комбінованих каротиновмісних продуктів30

**Ободович О.М., Іваницький Г.К., Гоженко Л.П.,
Целень Б.Я., Недбайло А.Є.**

Аналітичні дослідження ініціювання кавітаційних
ефектів у пульсаційному екстракторі з комбінованим
гідродинамічним пристроєм41

**Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кобзар А.С.,
Архипов О.П.**

Теплообмін при природній конвекції в пористому
мікроканалі з несиметричним обігрівом49

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

**Русанов Р.А., Русанов А.В., Дегтярьов К.Г.,
Крютченко Д.В.**

Трубчатий теплообмінник спірального типу для
високоєфективної електрогенеруючої установки57

**Гелетука Г.Г., Гивель М.М., Кучерук П.П.,
Сидоренко М.Р.**

Можливості виробництва передового біометану з
мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових
установок. Частина 265

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

**Ободович О.М., Целень Б.Я., Саблій Л.А.,
Радченко Н.Л., Недбайло А.Є.**

Сучасні технології водопідготовки для
теплоенергетики80

Макарчук Б.О., Пономаренко С.М.

Дослідження впливу форми соплового тракту на
термодинамічні та газодинамічні параметри вихлопу
малого реактивного двигуна89

Желєзна Т.А., Драгнєв С.В.

Проміжний піроліз як технологія для виробництва
рідких моторних біопалив100

Домбровський О.Г., Тракслер І.С., Потапова М.В.

Дослідження впливу процесу біометанування in-situ
на збільшення виробництва біометану в класичних
біогазових установках110

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 47, № 1, 2025

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
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

Congratulations to the jubilee: Corresponding Member
of the National Academy of Sciences of Ukraine
N.M.Fialko is 75 years old5

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

**Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S.,
Gnedash G.**

Problems of gas exhaust ducts operational reliability of
municipal solid waste incineration plants and ways to
solve them7

**Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Kovetska Yu.Yu.,
Anastasiev D.V.**

Effect of flow turbulence on detonation processes19

Petrova Zh.O., Grakov D.P.

Heat and mass transfer processes in the production of
combined carotene-containing products30

**Obodovych O.M., Ivanitsky G.K., Gozhenko L.P.,
Tselen B.Y., Nedbailo A.Y.**

Analytical studies of the initiation of cavitation effects in
the pulsation extractor with the combined hydrodynamic
device41

**Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kobzar A.S.,
Arkhyrov O.P.**

Heat transfer at natural convection in a flat porous
micro-channel with unsymmetrical heating49

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

**Rusanov R.A., Rusanov A.V., Kriutchenko D.V.,
Degtyarev K.G.**

Spiral-type tubular heat exchanger for high-efficiency
power generation unit.57

**Geletukha G.G., Hyvel M.M., Kucheruk P.P.,
Sydorenko M.R.**

Opportunities of advanced biomethane production from
microalgae grown on biogas plant digestate. Part 2.65

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

**Obodovych O., Tselen B., Sabliy L., Radchenko N.,
Nedbailo A.**

Modern water treatment technologies for thermal
power engineering80

Makarchuk B.O., Ponomarenko S.M.

A research on influence of exhaust shape on
thermodynamic and fluid dynamic exhaust properties of a
small-scale jet engine89

Zheliezna T.A., Drahnev S.V.

Intermediate pyrolysis as a technology to produce motor
biofuels100

Dombrovskiy O.G., Traksler I.S., Potapova M.V.

Research on the impact of the in-situ biomethanization
process on increasing biomethane production in classic
biogas plants110

До 75 річчя від дня народження Наталії Михайлівни Фіалко – видатної вченої, докторці технічних наук, професорці, членкині-кореспондентці Національної академії наук України



20 грудня виповнилося 75 років відомій вченій в галузі теплофізики і теплоенергетики, завідувачці відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій Інституту технічної теплофізики НАН України докторці технічних наук, професорці, членкині-кореспондентці НАН України, Заслуженому діячу науки і техніки, Лауреату Державної премії України з науки і техніки Наталії Михайлівні Фіалко.

Наталія Михайлівна закінчила з відзнакою Київський політехнічний інститут (нині Національний технічний університет «КПІ ім. Ігоря Сікорського») у 1972 р. Після його закінчення була направлена на роботу до Інституту технічної теплофізики НАН України, де пройшла шлях від інженера до завідувачки відділу, В 1975-78 рр. навчалася в аспірантурі, після закінчення якої захистила дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. В 1994 р. захистила докторську дисертацію. З 1995 по 2000 була вченим секретарем Інституту. З 2005 по 2012р. очолювала кафедру теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». З 1995 до теперішнього часу працює завідувачкою відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій в Інституті технічної теплофізики НАН України. В 1995 році була удостоєна почесного звання «Заслужений діяч науки і техніки». У 2000 році Наталія Михайлівна обрана членкинею-кореспонденткою Національної академії наук України за спеціальністю «Теплоенергетика», в 2005 р. – затверджена у вченому званні професорки.

Н.М. Фіалко провідна вчена України в галузі теплофізики та теплоенергетики, зокрема у моделюванні теплових процесів у енергетичному обладнанні, створенні нових ефективних систем енергопостачання, розробці прогресивних енергозберігаючих технологій; здійснила вагомий внесок у розвиток теорії моделювання складних багатовимірних нелінійних процесів переносу тепла і речовини; основні наукові праці Н.М. Фіалко присвячені розробці теплофізичних засад підвищення ефективності енергетичного обладнання, реконструкції і модернізації комунальної теплоенергетики, створенню та впровадженню сучасних вискоєфективних методів безаварійної експлуатації АЕС України тощо. Характерною особливістю робіт Фіалко Н.М. є комплексне вирішення наукових та науково-технічних проблем - від принципів теоретичних питань до розробки конкретних ресурсозберігаючих технологій та відповідного обладнання. Розроблені за її безпосередньою участю методи, технології та обладнання широко впроваджено на підприємствах енергетичної галузі.

Н.М. Фіалко здійснює активну педагогічну діяльність, викладає аспірантам різних років навчання, керує підготовкою дисертаційних робіт здобувачів наукових ступенів. Вона підготувала 15 кандидатів і 6 докторів технічних наук.

Високі досягнення Наталії Михайлівни здобули широке визнання науковою спільнотою країни. За роботу «Енергоефективні технології прискореного зведення об'єктів промислового та цивільного будівництва» вона була удостоєна звання Лауреата державної премії України в галузі науки і техніки. За багаторічну сумлінну працю, вагомий особистий внесок в науково-технічне забезпечення розвитку енергетики України, високий професіоналізм Н.М. Фіалко була відзначена званням «Почесний енергетик України», відзнакою Президії Національної академії наук України в 2009 і 2024 роках, Премією президентів академій наук України, Білорусі та Молдови. Неодноразово нагороджена орденом «За трудові досягнення» Міжнародного Академічного Рейтингу популярності «Золота Фортуна», за значні досягнення у педагогічній діяльності нагороджена медаллю К.Д. Ушинського НАПН України тощо.

Н.М. Фіалко активно співпрацює з закордонними організаціями, зокрема, з Факультетом енергетичних систем та ядерної науки, Технологічного інституту Університету Онтаріо, Ошава, Канада, з Ченстоховським Університетом, Республіка Польща, з Інститутом полімерів Болгарської академії наук, Гуандунським Інститутом Зварювання (Китайсько-Український Інститут Зварювання ім. Є.О. Патона).

Науковий доробок Н.М. Фіалко знайшов відображення у понад 1300 працях, серед яких 29 монографій та 48 патентів.

Н.М. Фіалко бере активну участь у роботі наукових та громадських організацій. Вона - вчений секретар Національного комітету України з тепло- та масообміну, Науково-технічної спілки енергетиків та електротехніків України та член експертної ради МОН України, членкиня редколегії журналів «Східно-європейського журналу передових технологій», «Теплофізика і теплоенергетика», «Відновлювана енергетика».

Наукова громадськість, колеги та друзі щиро вітають Наталію Михайлівну, відому вчену і чарівну жінку з ювілеєм і бажають міцного здоров'я, життєвої енергії, здійснення найзаповітніших мрій, нових значних досягнень і звершень для процвітання України.

УДК 536.24:621.184.5

ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Жученко І.М.,³ Шевчук С.І.⁴, Гнєдаш Г.О.⁵¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net³аспірант, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@gmail.com⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com⁵канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.1>

Наведено результати досліджень щодо використання трьох методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації для запобігання конденсації в газівідвідних трактах сміттєспалювальної установки з водогрійним котлом. Встановлено закономірності зміни тепловологісних показників в гирлі залізобетонної димової труби в різних режимах котла. Визначено межі результативного застосування кожного з методів для різних умов.

The research results on the use of three methods of heat and humidity treatment of exhaust gases after heat recovery to prevent condensation in the gas exhaust ducts of a waste incineration plant with a water-heating boiler are presented. The regularities of changes in thermal and humidity indicators in the mouth of a reinforced concrete chimney in different boiler modes were established. The limits of effective application of each method for different conditions are determined.

Бібл. 5, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: димові труби, запобігання конденсації, ефективність захисту від корозії. Q – теплопродуктивність, кВт; t – температура, °С; Δt – величина підігрівання, °С; X – вологовміст, г/кг с.г.; χ – частка байпасування; σ – частка підмішуваного повітря; γ – коефіцієнт витрат теплоти на реалізацію методу.

Індекси:

вх – вхід;

вих – вихід;

г – гази;

к – котел;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

пов – поверхня;

р – роса.

Вступ

Газівідвідні тракти є невід'ємною частиною і відповідальним елементом практично усіх паливоспоживальних енергетичних установок. До надто важливих елементів цих трактів належать димові труби, які служать для створення природної тяги та для відведення вихідних димових газів у верхні шари атмосфери і розсіювання їх до допустимих концентрацій шкідливих викидів, що містяться в цих газах і регламентуються чинними санітарними нормами.

До будівництва і безпечної експлуатації димових труб висуваються високі вимоги. Вони належать до дороговартісних інженерних споруд, що експлуатуються у складних умовах силових навантажень, температурних, вологісно- і хімічноагресивних впливів евакуйованих димових газів та навколишнього середовища [1]. Від експлуатаційної надійності димових труб залежить безперебійна та екологічно безпечна робота промислових та енергетичних об'єктів. Зниження цієї надійності пов'язано з корозійним руйнуванням труб в процесі

роботи. Основними причинами такого руйнування та виникнення аварійних і передаварійних ситуацій на вказаних об'єктах є порушення проєктних температурно-вологісних режимів газовідвідних трактив. Інтенсивність цього руйнування залежить від багатьох факторів, зокрема і від хімічної агресивності газового середовища, що відводиться димовими трубами.

Для зменшення експлуатаційного руйнування відвідних газоходів та димових труб паливоспоживальних установок застосовується ряд заходів [2, 3], результативність яких суттєво залежить від призначення та типу застосовуваної паливоспоживальної установки, конструкційних особливостей газовідвідних каналів, тепловолісних умов їхньої експлуатації, складу димових газів, їх хімічної агресивності тощо.

Сміттєспалювальні установки [4] також належать до енергетичних об'єктів, відповідальними елементами яких є газоходи та димові труби. Зважаючи на знижену температуру відхідних газів цих установок у разі застосування систем глибокої утилізації теплоти, ймовірну велику вологість та високу хімічну агресивність газів, розробка заходів щодо антикорозійного захисту газовідвідних трактив вказаних установок потребує особливої уваги.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета даного дослідження полягає у аналізі показників тепловолісного стану в гирлі димової труби сміттєспалювальної установки з водогрійним котлом в різних режимах його експлуатації за умов застосування технології глибокого охолодження димових газів і теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- виконати теплові розрахунки сміттєспалювального котла з пропонованою системою утилізації теплоти димових газів та визначити їхні тепловолісні показники на виході з системи;
- встановити закономірності зміни основних тепловолісних показників в гирлі залізобетонної димової труби в різних режимах експлуатації котла.

Методика проведення досліджень

Для утилізації теплоти відхідних газів сміттєспалювального котла застосовувалась комбінована система теплоутилізації. Тепловий розрахунок системи виконувався з використанням відомих методів розрахунку теплообмінного устаткування та результатів досліджень процесів тепло- і масопереносу при глибокому охолодженні димових газів в системах теплоутилізації котельних установок [5].

Для запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби розглядалось застосування трьох теплових методів тепловолісної обробки димових газів після теплоутилізації. Це методи: підсушування охолоджених в теплоутилізаційній системі димових газів у газопідігрівачі, байпасування частини гарячих газів від котла повз вказану систему та повітряний метод [2].

Розрахунок охолодження вихідних газів в газовідвідних трактах здійснювався за відомими методиками. Необхідною умовою безпечної експлуатації тракту (за відсутності конденсатоутворення) було дотримання в гирлі димової труби умови $t_{\text{пов}} \geq t_p$.

Температура t_p точки роси розраховувалась за формулою

$$t_p = F(X) = 16,129 \ln \frac{X \cdot 10^3}{0,1 \cdot e^{-0,0193X_k} + 3,824}, \quad (1)$$

а температура $t_{\text{пов}}$ поверхні в гирлі димової труби визначалась з рівнянь теплопередачі та теплового балансу стосовно до умов охолодження димових газів у відвідних каналах та димовій трубі.

Результати.

Розрахункові дослідження виконувались для установки з продуктивністю спалювання сміття 5 т/год. Установка призначена для використання теплоти згоряння побутового сміття в котлі, що працює для потреб опалення. Установка оснащена комбінованою системою теплоутилізації відхідних газів, в якій утилізована теплота використовується для попереднього нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води котельні. В теплоутилізаційній системі димові гази після котла спершу спрямовуються у теплоутилізатор, в якому підігривається повітря на горіння, а далі надходять у теплоутилізатор, призначений для підігрівання зворотної тепломережної води перед надходженням її до котла. Температури прямої та зворотної тепломережної води приймалися згідно з параметрами системи опалення з перепадом температур теплоносія 25°C та розрахунковою температурою навколишнього середовища -20°C. У водогрійному теплоутилізаторі в деяких його режимах реалізовувалось глибоке охолодження димових газів (нижче температури точки роси водяної пари, що міститься в газах). Розглядалась димова труба з висотою залізобетонної оболонки 120 м та товщиною стовбура 0,16 м. Розрахункові дані для виконання досліджень наведено в табл. 1.

За результатами виконаних розрахунків застосування вказаних систем теплоутилізації розглянутого котла забезпечує підвищення ефективності використання палива на 5 – 8 %.

В таблиці 2 наведено результати розрахунку температури димових газів після їх охолодження в комбінованій системі теплоутилізації в різних режимах сміттєспалювального котла протягом року. Значення цих температур слугували вихідними даними в дослідженнях ефективності застосування теплових методів запобігання конденсації утворенню в газовідвідних трактах включно до гирла розглянутих димових труб.

Оцінка ефективності розглянутих методів відвернення конденсації утворення у газовідвідному тракті

котельної установки здійснювалась за коефіцієнтом γ , що є відношенням теплової потужності $Q_{\text{вир}}$, необхідної для реалізації методу, до загальної потужності $Q_{\text{т}}$ системи теплоутилізації:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{вир}}}{Q_{\text{т}}} \cdot 100, \quad (2)$$

Відносне теплове навантаження сміттєспалювального котла змінювалось в діапазоні 100 – 40 % відповідно до зміни температури навколишнього середовища від -20 до +10 °C.

Розглянемо насамперед ефективність використання для покращення режимів експлуатації газовідвідних трактів включно до гирла димової труби одного з

Табл. 1. Вихідні дані

Table 1. Initial data

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	0,6 – 1,8
Вологовміст димових газів на виході з котла, кг/кг с.г.	0,15 – 0,25
Вологовміст димових газів на вході в димову трубу, кг/кг с.г.	0,95 – 0,25
Температура димових газів після котла, °C	200 – 250
Температура димових газів на вході в димову трубу, °C	52 – 84
Температура зворотної води системи опалення, °C	35 – 70
Температура води після водогрійного теплоутилізатора, °C	37,2 – 72,1
Температура повітря на вході у повітрогрійний теплоутилізатор, °C	-20 – 10
Температура повітря на виході з повітрогрійного теплоутилізатора, °C	137 – 197
Вологовміст нагрітого повітря, кг/кг с.г.	0,01

Табл. 2. Температура димових газів на виході з теплоутилізаційної системи в залежності від температури навколишнього середовища та за різних температур і вологовмісту димових газів за котлом

Table 2. Flue gas temperature at the outlet of the heat recovery system depending on the ambient temperature and at different temperatures and moisture content of the exhaust gases after the boiler

Вологовміст відхідних газів за котлом $X_{\text{вх}}^r$, г/кг с.г.	Температура вихідних газів $t_{\text{вх}}^r$, °C за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^r$, °C та температур димових газів за котлом $t_{\text{вх}}^r$, °C			
	-20	-10	0	10
$t_{\text{вх}}^r = 250$				
250	83,8	71,6	66,4	57,9
200	83,9	71,7	62,9	53,4
150	83,7	73,6	59,4	51,9
$t_{\text{вх}}^r = 200$				
250	77,5	68,4	66,3	59,0
200	77,4	67,1	62,7	54,5
150	77,4	68,4	58,9	52,4

найпоширеніших методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації – методу байпасування. Цей метод полягає в пропусканні частини χ гарячих газів від котла повз теплоутилізаційну систему з наступним їх змішуванням з газами, що охололи у цьому устаткуванні. За цих умов підвищується температура суміші газів на вході у газовідвідний тракт та температура точки роси в режимах глибокого охолодження димових газів в системах теплоутилізації. Умова $t_{\text{пов}} \geq t_p$ у цьому разі може дотримуватися завдяки підвищенню температури суміші газів на вході в димову трубу до такого рівня, що забезпечує перевищення температури поверхні $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p в гирлі димової труби. На рис. 1 подано принципову схему реалізації вказаного методу у разі застосування пропонованої системи теплоутилізації.

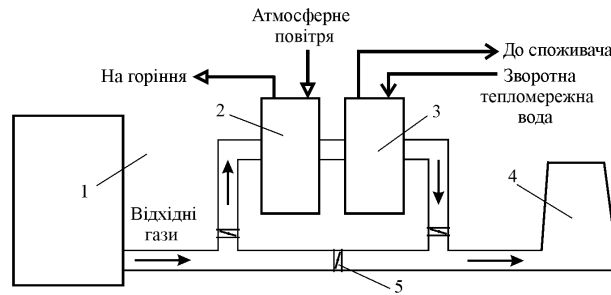


Рис. 1. Реалізація методу байпасування для запобігання конденсатотворенню в газовідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3- водонагрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан.

Fig. 1. Implementation of the bypass method to prevent condensate formation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system: 1 – boiler; 2 – air heater; 3 – water heater; 4 – chimney; 5 – control valve.

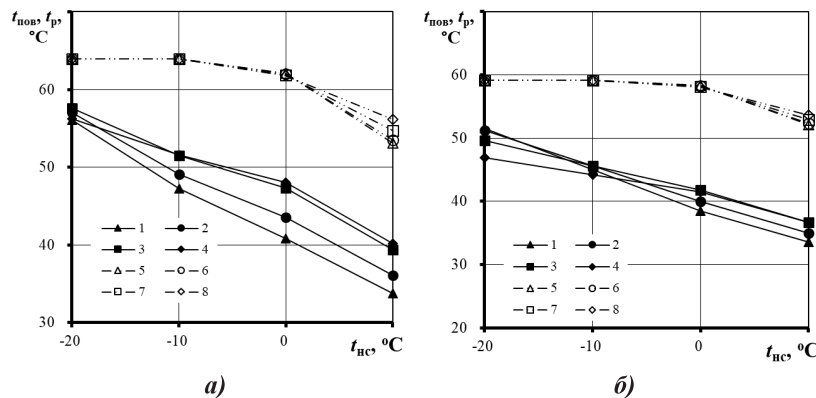


Рис. 2. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{\text{атм}}$ температури внутрішньої поверхні $t_{\text{пов}}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур $t_{\text{атм}}$ та вологовмісту $X_{\text{атм}}$ димових газів після котла і за різних часток байпасування χ :

а) $t_{\text{атм}} = 250$ °C, $X_{\text{атм}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{атм}} = 200$ °C, $X_{\text{атм}} = 150$ г/кг с.з.; 1, 5 – $\chi = 0\%$; 2, 6 – 10% ; 3, 7 – 30% ; 4, 8 – 50%

Fig. 2. Dependence on the ambient temperature $t_{\text{атм}}$ of the temperature of the inner surface t_s of the chimney mouth at different bypassing shares χ :

(1-4) and the dew point t_{dp} (5-8) at different temperatures $t_{\text{ин}}$ and moisture content $X_{\text{ин}}$ of exhaust gases after the boiler and at different bypassing shares χ :

а) $t_{\text{ин}} = 250$ °C, $X_{\text{ин}} = 200$ г/кг д.г.; б) $t_{\text{ин}} = 200$ °C, $X_{\text{ин}} = 150$ г/кг д.г.;

1, 5 – $\chi = 0\%$; 2, 6 – 10% ; 3, 7 – 30% ; 4, 8 – 50%

Характерні результати розрахункових досліджень щодо ефективності використання методу байпасування для відвернення конденсатоутворення у гирлі димової труби за різних температур та вологовмісту газів за котлом при зміні частки байпасування χ в межах 0 – 50 % подано на рис. 2. Рисунок ілюструє закономірності зміни тепловологісних показників (температури поверхні $t_{\text{пов}}$ та точки роси t_p) в гирлі досліджуваної димової труби в різних режимах роботи котла протягом опалювального періоду.

За результатами досліджень метод байпасування за розглянутих умов не дає позитивного результату в усіх розглянутих режимах котла з системою теплоутилізації відхідних газів. Так в гирлі димової труби не дотримується необхідна умова перевищення температури $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p . Навпаки, t_p є вищою ніж $t_{\text{пов}}$ на 2 – 20 °С в залежності від режиму роботи котла, температури $t_{\text{гвх}}$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ димових газів на його виході і частки байпасування газів χ . І значення $(t_p - t_{\text{пов}})$ є тим більшим, чим нижче значення температури $t_{\text{гвх}}$ вище $X_{\text{вх}}$, вища температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища та більша частка байпасування χ .

Отримані результати є очікуваними, оскільки метод байпасування дуже чутливий до значень вологовмісту газів $X_{\text{вх}}$, бо підмішування байпасованих газів з високим вологовмістом у вихідні гази після теплоутилізаційної системи збільшує вологовміст суміші, а відтак і точку роси цієї суміші.

На рис. 3 наведено результати досліджень щодо відносних витрат теплоти (формула 2) на реалізацію методу байпасування. Як видно, цей метод потребує значних витрат, які досягають за розглянутих χ більше 40% можливого обсягу утилізованої теплоти (за відсутності байпасування). І навіть за таких витрат метод байпасування не забезпечує позитивного результату в плані відвернення випадення конденсату в гирлі залізобетонної труби. За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про низьку ефективність застосування лише одиночного методу для запобігання конденсатоутворенню в розглянутій трубі.

Перейдемо до розгляду ефективності використання методу запобігання конденсатоутворенню у газопідвідних трактах шляхом підігрівання у газопідігрівачі охолоджених в системі теплоутилізації димових газів. Газопідігрівач слугує для збільшення температури газів $t_{\text{вих}}$ на його виході до рівня, що відповідає перевищенню температури $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p при сталому значенні абсолютної вологості димових газів, а відтак і точки роси. На рис. 4 наведено принципову схему із застосуванням вказаного теплового методу, в якій тепловологісна обробка димових газів реалізується шляхом їх підігрівання на 0 – 30 °С прямою водою котла. Результати досліджень щодо ефективності методу для запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби наведено на рис. 5.

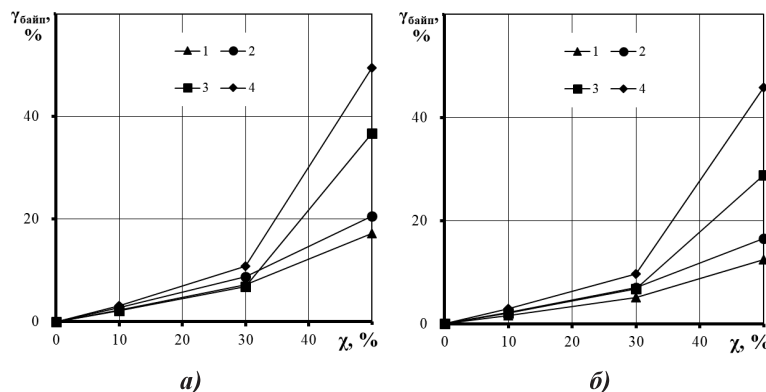


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{байп}}$ на реалізацію теплового методу байпасування газів від частки байпасування χ за різних температур t_{ex}

та вологовмісту X_{ex} димових газів після котла і температур навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$:

а) $t_{\text{ex}} = 250$ °C; $X_{\text{ex}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{ex}} = 200$ °C; $X_{\text{ex}} = 150$ г/кг с.з.; 1 – при $t_{\text{нс}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C.

Fig. 3. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{bayp} for the implementation of the gas bypassing heat method on the bypass share χ at different temperatures t_{in} and moisture content X_{in} of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures t_{amb} :

а) $t_{\text{in}} = 250$ °C; $X_{\text{in}} = 200$ г/кг д.г.; б) $t_{\text{in}} = 200$ °C; $X_{\text{in}} = 150$ г/кг д.г.; 1 – $t_{\text{amb}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C.

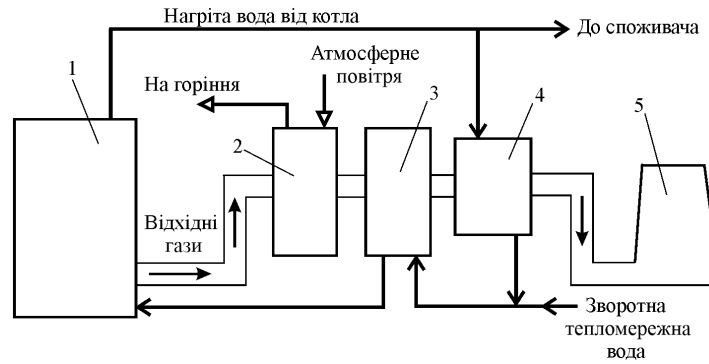


Рис. 4. Реалізація методу підсушування для запобігання конденсації в газівідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3 – водонагрівач; 4 – газонагрівач; 5 – димова труба.

Fig. 4. Implementation of the drying method to prevent condensation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system:

1 - boiler; 2 - air heater; 3 - water heater; 4 - gas-heater; 5 - chimney.

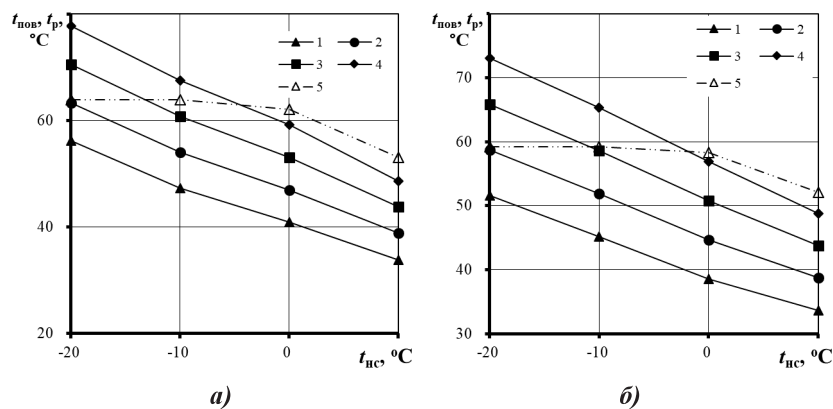


Рис. 5. Залежність від температури навколишнього середовища t_{nc} температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5) за різних температур димових газів $t_{вх}$ та вологовмісту $X_{вх}$ після котла і величини підігрівання охолоджених газів Δt :

а) $t_{вх} = 250$ °C; $X_{вх} = 200$ г/кг с.г.; б) $t_{вх} = 200$ °C; $X_{вх} = 150$ г/кг с.г.; 1 – $\Delta t = 0$ °C; 2 – 10 °C; 3 – 20 °C; 4 – 30 °C

Fig. 5. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s of the chimney mouth (1-4) and the dew point t_{dp} (5) at different exhaust gas temperatures t_{in} and moisture content X_{in} after the boiler and the value of heating of the cooled gases Δt :

а) $t_{in} = 250$ °C; $X_{in} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{in} = 200$ °C; $X_{in} = 150$ g/kg d.g.; 1 – $\Delta t = 0$ °C; 2 – 10 °C; 3 – 20 °C; 4 – 30 °C.

Аналіз отриманих результатів досліджуваних тепловологічних показників (температури поверхні $t_{пов}$ та точки роси t_p) в гирлі залізобетонної димової труби свідчить, що метод підсушування є більш результативним, ніж метод байпасування. За результатами досліджень, в деяких режимах реалізується перевищення температури поверхні $t_{пов}$ над температурою точки роси t_p . І це має місце лише за великих навантажень котла, що відповідають низьким температурам навколишнього

середовища ($t_{nc} < -5$ °C), високим температурам газів на виході з котла ($t_{вх} > 200$ °C) та рівнів підігрівання охолоджених газів у газопідігрівачі Δt , що повинні здебільшого перевищувати 30 °C. При $\Delta t = 20$ °C нормативний режим експлуатації труби може реалізуватись лише в режимах котла, близьких до номінальних.

Щодо рівнів витрат теплоти $\gamma_{підс}$ на реалізацію методу підсушування (рис. 6), то вони є меншими у порівнянні з методом байпасування. Так максимальне значення

коефіцієнта $\gamma_{\text{підс}}$ не перевищує значення 25%. І це значення тим менше, чим менший рівень Δt підігрівання газів, вища температура $t_{\text{вх}}^{\text{г}}$ газів та вологовміст $X_{\text{вх}}$ на вході в теплоутилізаційну систему і нижча температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища.

Узагальнюючи результати виконаних досліджень щодо ефективності методу підсушування, можна стверджувати, що за розглянутих умов цей метод не забезпечує запобігання конденсації в димовій трубі у переважній більшості режимів розглянутого котла протягом періоду його експлуатації.

Наступним методом, що сприяє відверненню конденсації в газівідвідному тракті, є повітряний метод (рис. 7). У разі застосування методу відбувається підмішування у гази після теплоутилізації частки σ нагрітого в системі теплоутилізації повітря, що забезпечує зниження точки роси суміші газів і повітря, а також підвищення температури цієї суміші перед надходженням її у димову трубу. Частка σ є відношенням обсягу підмішуваного повітря до обсягу димових газів.

Дотримання умови $t_{\text{пов}} \geq t_{\text{р}}$ у разі застосування даного методу забезпечується і завдяки підвищенню $t_{\text{пов}}$,

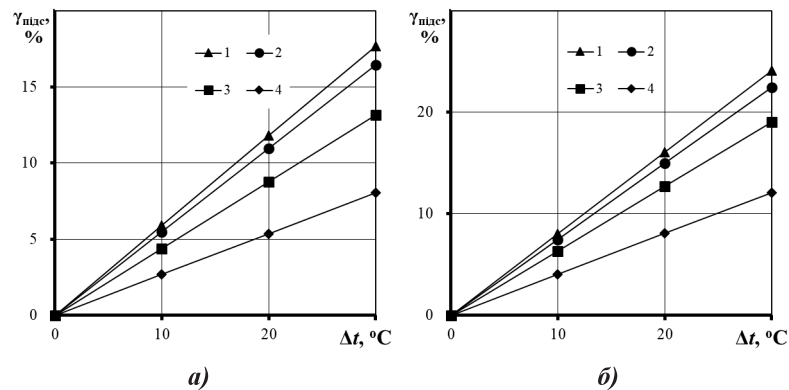


Рис. 6. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{підс}}$ на реалізацію теплового методу підсушування відхідних газів від величини підігрівання Δt за різних температур $t_{\text{вх}}^{\text{г}}$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ димових газів після котла і температур навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$:

а) $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ г/кг с.з.; 1 – при $t_{\text{нс}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C

Fig. 6. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{dry} for the implementation of the drying exhaust gases heat method on the value of heating Δt at different temperatures $t_{\text{in}}^{\text{г}}$ and the moisture content X_{in} of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures t_{amb} :

а) $t_{\text{in}}^{\text{г}} = 250$ °C; $X_{\text{in}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{in}}^{\text{г}} = 200$ °C; $X_{\text{in}} = 150$ g/kg d.g.; 1 – $t_{\text{amb}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C

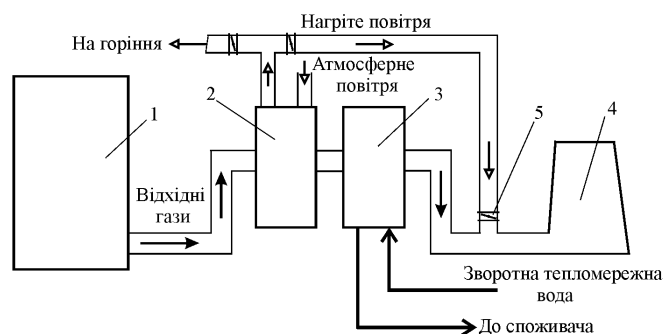


Рис. 7. Реалізація повітряного методу для запобігання конденсації в газівідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан

Fig. 7. Implementation of the air method for preventing condensation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system:

1 - boiler; 2 - air heater; 3 - water heater; 4 - chimney; 5 - control valve

що досягається збільшенням температури суміші димових газів при підмішуванні нагрітого повітря, і завдяки зменшенню точки роси t_p шляхом додавання повітря з низькою вологістю ($< 0,01$ кг/кг с.п.). В табл. 3 наведено розрахункові значення температур підмішуваного повітря, нагрітого в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи, в залежності від режиму роботи сміттєспалювального котла.

Результати розрахунків досліджуваних тепловологісних показників в гирлі розглянутої димової труби та відносних витрат теплоти на застосування повітряного методу подано на рис. 8, 9. Аналіз наведених результатів свідчить, що у разі використання цього методу запобігання конденсоутворенню за часток підмішування повітря σ до 30 % реалізується лише в режимах роботи котла, близьких до номінальних, які відповідають низьким

Табл. 3. Температура нагрітого повітря для підмішування у вихідні гази в залежності від температури навколишнього середовища за різних температур димових газів на виході з котла

Table 3. Temperature of heated air for mixing into the exhaust gases depending on the ambient temperature at different exhaust gas temperatures at the boiler outlet

Вологовміст відхідних газів котла $X_{\text{вх}}^r$, г/кг с.г.	Температура нагрітого повітря $t_{\text{вих}}^{\text{п}}$, °C за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °C та температур димових газів за котлом $t_{\text{вх}}^r$, °C			
	-20	-10	0	10
$t_{\text{вх}}^r = 250$				
250	171,6	178,4	186,4	196,5
200	172,3	178,9	186,9	196,9
150	171,6	178,9	186,9	196,9
$t_{\text{вх}}^r = 200$				
250	137,6	143,7	150,5	159,0
200	137,4	143,4	150,3	158,8
150	137,4	143,4	150,3	158,8

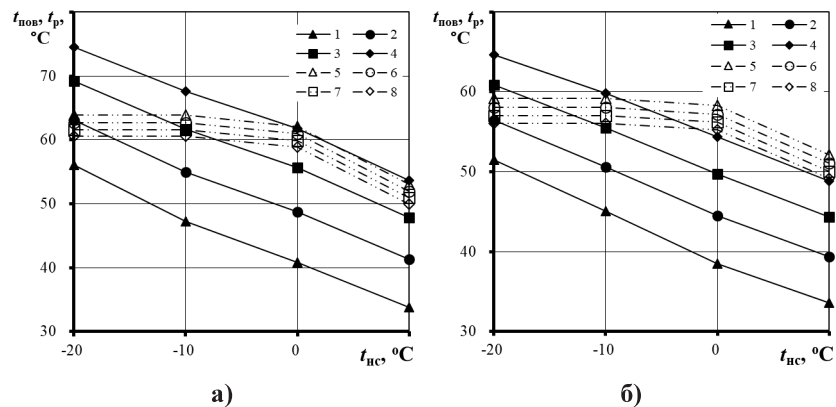


Рис. 8. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ температури внутрішньої поверхні $t_{\text{нов}}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур димових газів $t_{\text{вх}}^r$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ після котла і частки підмішуваного повітря σ :

а) $t_{\text{вх}}^r = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ г/кг с.г.; б) $t_{\text{вх}}^r = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ г/кг с.г.; 1,5 – $\sigma = 0\%$; 2,6 – 10% ; 3,7 – 20% ; 4,8 – 30%

Fig. 8. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the internal surface temperature t_s at the chimney mouth

(1-4) and dew point t_p (5-8) at different exhaust gas temperatures $t_{\text{вх}}^r$ and moisture content $X_{\text{вх}}$ after the boiler and

the mixing air share σ : а) $t_{\text{вх}}^r = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{вх}}^r = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ g/kg d.g.; 1,5 – $\sigma = 0\%$; 2,6 – 10% ; 3,7 – 20% ; 4,8 – 30%

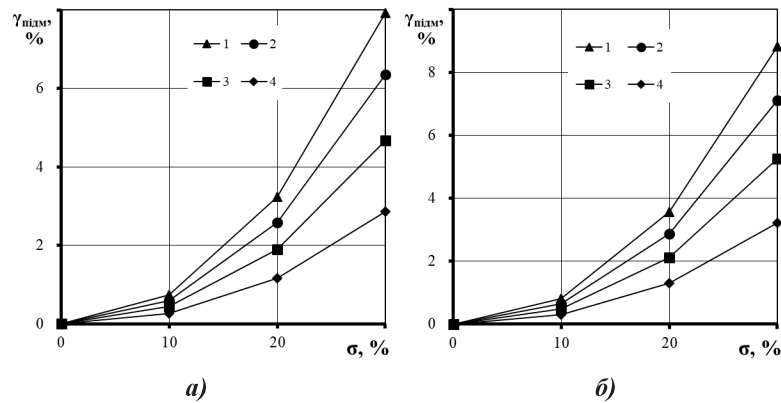


Рис. 9. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{підм}}$ на реалізацію повітряного теплового методу від частки підмішуваного повітря σ за різних температур $t_{\text{вх}}$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ димових газів після котла і температур навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$:

a) $t_{\text{вх}} = 250^\circ\text{C}$; $X_{\text{вх}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$; $X_{\text{вх}} = 150$ г/кг с.з.; 1 – при $t_{\text{нс}} = -20^\circ\text{C}$; 2 – -10°C ; 3 – 0°C ; 4 – 10°C
Fig. 9. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{mix} for the implementation of the air heat method on the mixing air share σ at different temperatures t_{in} and the moisture content X_{in} of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures t_{amb} : a) $t_{\text{in}} = 250^\circ\text{C}$; $X_{\text{in}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{in}} = 200^\circ\text{C}$; $X_{\text{in}} = 150$ g/kg d.g.; 1 – $t_{\text{amb}} = -20^\circ\text{C}$; 2 – -10°C ; 3 – 0°C ; 4 – 10°C

Табл. 4. Витрати теплоти на застосування теплового методу

Table 4. Heat consumption for the application of the thermal method

Застосовувані теплові методи	Максимальне значення коефіцієнта відносних витрат теплоти на реалізацію методу γ , %
Байпасування	більше 40
Підсушування димових газів в теплообміннику-газопідігрівачі	до 25
Повітряний	до 10

температурам навколишнього середовища. Причому, значення σ , необхідне для відвернення конденсатотворення в гирлі димової труби, тим менші, чим вища температура $t_{\text{вх}}$ та нижчий вологовміст $X_{\text{вх}}$ димових газів після котла, нижча температура навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ (більше навантаження котла). За результатами досліджень відносні витрати теплоти $\gamma_{\text{підм}}$ на реалізацію цього методу є найменшими у порівнянні з двома іншими методами. Максимальні значення $\gamma_{\text{підм}}$ не перевищують 9 % і відповідають режимам найменших навантажень котла (при $t_{\text{нс}} = +10^\circ\text{C}$) і високим температурам димових газів на вході в теплоутилізаційну систему ($t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$).

Порівняння ефективності застосування вказаних методів за значеннями коефіцієнта використання теплоти γ наведено в таблиці 4. Отримані результати свідчать про перспективність використання повітряного методу.

Висновки.

1. Виконано розрахункові дослідження щодо ефективності використання для сміттєспалювальних

установок з водогрійним опалювальним котлом комбінованих систем теплоутилізації відхідних газів, призначених для нагрівання дуттьового повітря та зворотної тепломережної води. Встановлено, що:

- застосування систем забезпечує підвищення ефективності використання палива на 5 – 8 %;

- в деяких режимах котла відбувається суттєве зниження температури вихідних газів, що призводить до конденсатотворення в димовій трубі, яке викликає її корозійне зношування і потребує вживання заходів для антикорозійного захисту цієї труби.

2. Досліджено ефективність використання для антикорозійного захисту газопровідних трактів котла шляхом запобігання в них конденсатотворенню трьох методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації: методу байпасування частини відхідних газів котла повз теплоутилізаційну систему, підсушування охолоджених газів у газопідігрівачі та підмішування до цих газів частини повітря, нагрітого у вказаній системі.

Показано, що:

- метод байпасування за розглянутих умов не є результативним для запобігання конденсації в усіх режимах котла, оскільки в гирлі димової труби температура поверхні $t_{\text{пов}}$ є нижчою точки роси t_p . І значення $(t_p - t_{\text{пов}})$ є тим більшим, чим менша температура $t_{\text{вх}}^r$, та більший вологовміст $X_{\text{вх}}^r$ газів за котлом, нижча температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища та більша частка байпасування χ ;

- метод підсушування дає позитивні результати для відвернення конденсації в димовій трубі за великих навантажень котла, що відповідають низьким температурам навколишнього середовища ($t_{\text{нс}} < -5^\circ\text{C}$), високим температурам газів на виході з котла ($t_{\text{вх}}^r > 200^\circ\text{C}$) та за рівнів підігрівання Δt охолоджених газів у газопідігрівачі, що перевищують здебільшого 30°C ;

- повітряний метод за розглянутих часток σ (до 30 %) підмішування нагрітого в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи повітря забезпечує відвернення конденсації в гирлі димової труби в режимах котла, близьких до номінальних, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища. І значення σ тим менші, чим вища температура $t_{\text{вх}}^r$ та вологовміст $X_{\text{вх}}^r$ димових газів за котлом;

- витрати теплоти на реалізацію повітряного методу є найменшими у порівнянні з двома іншими методами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Войцехівський О.В., Попов В.О., Дорохова Н.Д. Інноваційні технології улаштування і реконструкції залізобетонних димових труб. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2017. № 2. С. 13–18.
2. Фялко Н.М., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография.: Київ: «Про формат». 2018. 248 с. ISBN 978-966-02-8640-5.
3. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., & Gnedash, G. (2023). Anticorrosive Protection of Gas Exhaust Ducts of Boiler Plants with Heat-Recovery Systems. In Systems, Decision and Control in Energy V (pp. 425-435). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_22
4. Козій О.І., Петрук М.П., Вахула О.М. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід. Комунальне господарство міст. 2015. № 120(1). С. 122–125.
5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presic G.O., and Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Nauka innov no. 2. P. 47—53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

PROBLEMS OF GAS EXHAUST DUCTS OPERATIONAL RELIABILITY OF MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION PLANTS AND WAYS TO SOLVE THEM

Fialko N.¹, Navrodska R.², Zhuchenko I.³, Shevchuk S.⁴,
Gnedash G.⁵

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, 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

³postgraduate student, Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021, orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@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/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁵PhD (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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.1>

The work is devoted to research on creating conditions for the safe operation of gas exhaust ducts of solid waste incineration plants. The operation of these ducts is characterized by difficult conditions that lead to their corrosion destruction, especially the last section of the duct - the chimney. The development of measures for the chimneys corrosion protection in the case of using deep flue gas heat recovery systems requires special attention due to the likely high humidity and high chemical aggressiveness of these gases. The purpose of the study is to analyze the indicators of thermal and humidity state in the chimney mouth of a waste incinerator plant with a water-heating

boiler in its different operation modes under the conditions of using the technology of deep cooling of exhaust gases and thermal methods of preventing condensation in gas exhaust ducts. The main objectives of the study were to perform thermal calculations of the boiler with the proposed heat recovery system and to establish patterns of change in the main thermal and humidity indicators at the mouth of the reinforced concrete chimney under different boiler operating conditions. Known thermal calculation methods of heat and power plants installations and the results of our own research on heat exchange during deep cooling of exhaust gases were used. The results on the effectiveness of using the methods of heat and humidity treatment of flue gases after heat recovery to prevent condensation in the reinforced concrete chimney of the considered boiler are presented. Three thermal methods were investigated: bypassing a part of the boiler exhaust gases past the heat recovery system, drying the cooled gases in a gas-heater, and mixing a part of the air heated in the system with these gases. The regularities of changes in thermal and humidity indicators in the chimney mouth are established and the limits of effective application of each method under different conditions are determined. It is shown that the bypassing method is not effective for preventing condensation under all the conditions considered; the drying method gives positive results for preventing condensation in the chimney mouth at high boiler loads corresponding to low ambient temperatures ($t_{\text{amb}} < -5^{\circ}\text{C}$), high gas temperatures at the boiler outlet ($t_{\text{inp}}^{\text{g}} > 200^{\circ}\text{C}$) and at the levels of heating of cooled gases in the gas-heater Δt , which mostly exceed 30°C ; the air method at the share of σ (up to 30 %) of the mixed air ensures the prevention of condensation in the chimney mouth in boiler operating conditions close to the nominal. It is also shown that the heat consumption for the implementation of the air method is the lowest compared to the other two methods.

References 5, tables 4, figures 9.

Key words: chimneys, prevention of condensation, corrosion protection efficiency.

1. Voichevsky O., Popov V., Dorohova N. Inovatsiyni tekhnolohii ulashtuvannia i rekonstruktsii zalizobetonnykh dymovykh trub [Innovative technologies of embroidery and reconstruction of rail concrete chimneys]. Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi. 2017. № 2. P. 13–18. (in ukr.)

2. Fialko N. M., Navrodskaia R. A., Shevchuk S. I., Stepanova A. I., Presich G.O Gnedash G.O. Teplovyye metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotelnykh ustanovok [Thermal methods of gas exhaust ducts protection of boiler plants]. Kyiv: «Pro format». 2018. 248 p. ISBN 978- 966-02-8640-5. (in rus.)

3. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., & Gnedash, G. (2023). Anticorrosive Protection of Gas Exhaust Ducts of Boiler Plants with Heat-Recovery Systems. In *Systems, Decision and Control in Energy V* (pp. 425-435). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_22

4. Koziy O., Petruk M., Vakhula O. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід [Thermal neutralization solid waste: european experience]. *Komunalne hospodarstvo mist.* 2015. № 120(1). P. 122–125. (in ukr.)

5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., and Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. *Nauka innov no. 2.* P. 47—53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

Отримано 04.02.2025

Received 04.02.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 532.536

ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПОТОКУ НА ПРОЦЕСИ ДЕТОНАЦІЇ

Авраменко А.О.¹, член-кореспондент НАН України, Тирінов А.І.², докт. тех. наук,
Ковецька Ю.Ю.³, докт. філ., Анастасєв Д.В.⁴ (аспірант)

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2454-9113>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4759-274X>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.2>

В роботі представлено результати дослідження впливу ступеню турбулентності при переході потоку через нормальну детонаційну ударну хвилю. Виведено модифіковане рівняння Гюгоніо, яке враховує тепловий ефект і рівень турбулентності потоку. Показано вплив турбулентності на швидкість продуктів детонації. Визначено залежність, яка дозволяє оцінити вплив тепловиділення і турбулентності на швидкість перед ударною хвилюю.

The results of a study on the effect of turbulence degree during the transition of a flow through a normal detonation shock wave are presented. A modified Hugoniot equation is derived, taking into account thermal effects and the turbulence level of the flow. The effect of turbulence on the velocity of detonation products is demonstrated. A dependency is determined that allows evaluating the effect of heat release and turbulence on the velocity ahead of the shock wave.

Бібл. 25

Ключові слова: детонація, ударна хвиля, турбулентність, тепловиділення.

a – швидкість звуку;

c_p – питома теплоємність при постійному тиску;

c_v – питома теплоємність при постійному об'ємі;

h – ентальпія;

K – кінетична енергія турбулентності;

p – тиск;

T – температура;

V – швидкість;

$\mathfrak{R}$ – універсальна газова стала

x – координата;

γ – питома теплоємність;

ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії;

ρ – густина;

Безрозмірні параметри

Jo – число Жуґе

Eu – число Ейлера

Ma – число Маха

Індекси

1 – параметри до ударної хвилі;

2 – параметри після ударної хвилі.

Вступ

Дослідження детонаційного горіння актуальні для попередження вибухів у нафтогазовій та вугільній промисловості. Вивчення детонаційних процесів у газоподібних середовищах також становить інтерес для авіаційної та аерокосмічної промисловості [1], водневої енергетики [2]. Теорія детонації заснована на теорії ударних хвиль [3 - 7]. Хвиля детонації складається з тривимірної системи ударних хвиль, що супроводжується фронтом реакції горіння. Зусилля вчених спрямовані на дослідження течії поблизу фронту детонації, стійкості детонаційної хвилі та взаємодії ударної хвилі з турбулентною течією [8].

У роботі [9 -11] представлено огляд експериментальних та теоретичних досліджень щодо впливу

турбулентності у процес переходу горіння до детонації. Виявлено, що локально виміряна турбулентна швидкість полум'я перевищує швидкість дефлаграції за Чепменом-Жуге, що призводить до неконтрольованого перехідного стану, який зрештою завершується детонацією. У роботі [12] представлені результати чисельного моделювання взаємодії детонації та турбулентності у суміші водню, кисню та аргону. Аналіз властивостей турбулентності та турбулентних коливань під час детонації показує, що прямий вплив турбулентності на фронт полум'я є слабким. Основний внесок турбулентності полягає у створенні різних ударних сил, які можуть призводити до різних швидкостей реакції. Експериментальне та чисельне дослідження впливу початкової турбулентності на вибухову поведінку метано-повітряних сумішей

було проведено у роботі [13]. Показано, що початкова турбулентність може збільшувати максимальний тиск вибуху та максимальну швидкість зростання тиску, скорочувати час досягнення максимального тиску вибуху та підвищувати силу вибуху.

Вплив турбулентної течії на хвильові процеси розглядаються в [14,15]. Результати аналітичного дослідження поширення нормальних ударних хвиль в адіабатичному потоці газу представлені у роботах [16-21]. Проаналізовано поширення ударних хвиль у турбулентному потоці [16,17], у потоці газу Ван дер Ваальса [18-20] та в потоці газу з наночастинками [21]. Показано вплив турбулентності потоку, властивостей реального газу та концентрації наночастинок у потоці на інтенсивність ударних хвиль.

Зважаючи на вищесказане, можна сказати, що турбулентна детонація ще не аналізувалась на основі К-ε моделі. Використання цієї моделі може показати, як змінюються параметри турбулентності при проходженні потоку через детонаційний стрибок. Також може бути показано вплив турбулентності положення адіабати Гюгоніо, тобто можна показати зв'язок термодинаміки та газодинаміки потоку в детонаційній хвилі.

Тому в даній роботі теоретично досліджено взаємодію турбулентного газового потоку з нормальною детонаційною хвилею. Метою даної роботи є дослідження впливу турбулентності газового потоку на процес детонації. Для аналізу турбулентності вперше була використана спрощена модель К-ε.

Математична модель

Розглядається процес детонації в турбулентному потоці газу, що проходить через плоску детонаційну хвилю. Стаціонарний турбулентний потік газу описується системою рівнянь збереження маси, імпульсу, енергії

$$\frac{d(\rho V)}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\rho V \frac{dV}{dx} = -\frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\rho V \left(h + \frac{V^2}{2} + q \right) \right) = 0, \quad (3)$$

Тут q визначає енергію, що відводиться ($q < 0$), або що виділяється ($q > 0$) на одиницю маси в результаті відповідного процесу.

Рівняння (1)–(3) є класичною системою рівнянь Ренкіна–Гюгоніо для ударної хвилі. Параметр q описує тепловиділення в процесі детонації. Введення цього параметра модифікує систему рівнянь Ренкіна–Гюгоніо. У цьому наближенні, заснованому на гіпотезі Марковіна [22], нехтуємо пульсаціями густини через припущення, що число Маха менше п'яти.

Прирівнюємо (1) та (2), (1) та (3). Потім інтегруючи, отримаємо

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2, \quad (4)$$

$$p_1 + \rho_1 V_1^2 = p_2 + \rho_2 V_2^2, \quad (5)$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{V_2^2}{2}, \quad (6)$$

Далі, слідуючи Рейнольдсу [23], представимо швидкість, тиск та ентальпію в турбулентному потоці як суму усередненої та пульсаційної складових

$$V = \bar{V} + V', \quad (7)$$

$$p = \bar{p} + p', \quad (8)$$

$$h = \bar{h} + h' = c_p (T + T'), \quad (9)$$

Підставляючи (7) – (9) в рівняння (4) – (6), отримаємо

$$\rho_1 \bar{V}_1 = \rho_2 \bar{V}_2, \quad (10)$$

$$\bar{p}_1 + \rho_1 (\bar{V}_1^2 + \overline{V_1'^2}) = \bar{p}_2 + \rho_2 (\bar{V}_2^2 + \overline{V_2'^2}), \quad (11)$$

$$\bar{h}_1 + \frac{1}{2} (\bar{V}_1^2 + \overline{V_1'^2}) + q = \bar{h}_2 + \frac{1}{2} (\bar{V}_2^2 + \overline{V_2'^2}). \quad (12)$$

При цьому використовуємо правила усереднення Рейнольдса [23]

$$\overline{\bar{\phi}} = \bar{\phi}, \quad \overline{\phi'} = 0. \quad (13)$$

Для опису параметрів турбулентності можна застосувати спрощену К-ε модель

$$V \frac{dK}{dx} = -\varepsilon. \quad (14)$$

$$V \frac{d\varepsilon}{dx} = -C_\varepsilon \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad (15)$$

де $C_\varepsilon = 1.5 - 2$ – константа $K - \varepsilon$ моделі.

Окремо розглянемо рівняння (14) та (15). Помножимо рівняння (14) на густину. В результаті маємо

$$\frac{dN}{dx} = -E. \quad (16)$$

де

$$N = \rho VK, \quad (17)$$

$$E = \rho \varepsilon. \quad (18)$$

Помножимо рівняння (15) на густину. Це дає

$$\frac{dZ}{dx} = -C_\varepsilon \frac{ZE}{N}, \quad (19)$$

де

$$Z = \rho V \varepsilon, \quad (20)$$

$$C_\varepsilon = 1.68 \dots 1.92. \quad (21)$$

Враховуючи (16), перепишемо (19) у вигляді

$$\frac{dZ}{dx} = C_\varepsilon \frac{Z}{N} \frac{dN}{dx}. \quad (22)$$

Інтегрування (22) дає

$$\frac{K^{C_\varepsilon}}{\varepsilon} = \text{const}. \quad (23)$$

Таким чином, система рівнянь (4) – (6) доповнюється умовою

$$K_1 \varepsilon_1^{-C_\varepsilon} = K_2 \varepsilon_2^{-C_\varepsilon}. \quad (24)$$

Система (4), (5), (6) та (24) є модифікованою системою рівнянь Ренкіна–Гюгоніо. Умови Ренкіна–Гюгоніо (умови стрибка) описують залежність параметрів течії перед ударною хвилею, або хвилею горіння (дефлаграції або детонації), та за ударною хвилею у одномірному потоці рідини. А також під час одномірної деформації в твердих тілах.

Якщо врахувати, що числове значення константи C_ε є близьким до двох, то з рівняння турбулентної в'язкості за K – ε моделлю випливає, що турбулентна в'язкість зберігає своє значення при проходженні течії через ударну хвилю. Таким чином, було отримано закон зміни параметрів турбулентної течії в ударній хвилі.

В результаті інтегрування системи рівняння для кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації було отримано умову (23). Умова (24) виводиться з умови (23) та демонструє інваріантність параметрів турбулентності в потоках з ударними хвилями.

Система (19), (20), (22) замикається рівнянням стану ідеального газу

$$p = \rho \Re T, \quad (25)$$

де $\Re$ - універсальна газова стала

$$\Re = c_p \frac{\gamma - 1}{\gamma}, \quad (26)$$

$\gamma = c_p / c_v$ - питома теплоємність.

В результаті рівняння (12) можна переписати у вигляді

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\bar{p}_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} (\bar{V}_1^2 + \bar{V}_1'^2) + q = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\bar{p}_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} (\bar{V}_2^2 + \bar{V}_2'^2). \quad (27)$$

Модифіковане рівняння Гюгоніо

Враховуючи рівняння (10), перетворюємо рівняння (11) на форму

$$\bar{p}_1 - \bar{p}_2 = \rho_1 \bar{V}_1 (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) + \rho_2 \bar{V}_2'^2 - \rho_1 \bar{V}_1'^2. \quad (28)$$

Помножимо (28) на множник

$$\frac{\bar{V}_2 + \bar{V}_1}{\rho_1 \bar{V}_1} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \quad (29)$$

В результаті отримаємо

$$(\bar{p}_1 - \bar{p}_2) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = \bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 + (\rho_2 \bar{V}_2'^2 - \rho_1 \bar{V}_1'^2) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = \bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 + 2K_1 \left(\rho_2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - \rho_1 \right) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (30)$$

З (27) слідує

$$\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{\bar{p}_1}{\rho_1} - \frac{\bar{p}_2}{\rho_2} \right) + 2q + \bar{V}_1'^2 - \bar{V}_2'^2 = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{\bar{p}_1}{\rho_1} - \frac{\bar{p}_2}{\rho_2} \right) + 2q - 2K_1 \left(\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - 1 \right). \quad (31)$$

Під час виведення рівнянь (30) та (31) було враховано, що

$$K = \frac{\bar{V}'^2}{2} \quad (32)$$

Щоб виключити швидкість, прирівнюємо рівняння (30) та (31). У результаті маємо

$$(\bar{p}_1 - \bar{p}_2) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) - 2K_1 \left(\rho_2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - \rho_1 \right) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{\bar{p}_1}{\rho_1} - \frac{\bar{p}_2}{\rho_2} \right) + 2q - 2K_1 \left(\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - 1 \right) \quad (33)$$

Ділимо обидві сторони рівняння на і множимо ρ_1 на. Це дає

$$\left[\left(1 - \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \right) - \frac{2K_1 \rho_1}{\bar{p}_1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - 1 \right) \right] \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \right) + 2q \frac{\rho_1}{\bar{p}_1} - \frac{2K_1 \rho_1}{\bar{p}_1} \left(\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{C_\varepsilon} - 1 \right) \quad (34)$$

Введемо безрозмірні параметри
де

$$P = \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}, \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad k = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}, \quad G = \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/\gamma} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (35)$$

$$Jo = 2q \frac{\rho_1}{\bar{p}_1} = 2\gamma q \frac{\rho_1}{\gamma \bar{p}_1} = 2 \frac{\gamma q}{a_1^2}, \quad Eu = \frac{\rho_1 \bar{V}_1^2}{\bar{p}_1} = \frac{2\rho_1 K_1}{\bar{p}_1}. \quad (36)$$

Розв'язуючи рівняння (34) щодо $\bar{p}_2/\bar{p}_1$, отримуємо

$$\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} = \frac{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \frac{\rho_1}{\rho_2} + Eu \left(\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/\gamma} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 - 1 \right) \frac{\rho_1}{\rho_2} + Jo}{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1} \quad (37)$$

У безрозмірній формі це рівняння запишеться у вигляді

$$P = \frac{k - R^{-1} + Eu(GR^2 - 1)R^{-1} + Jo}{kR^{-1} - 1}, \quad (38)$$

Рівняння (37), (38) і (35) описують модифіковане рівняння Гюгоніо для детонації. Якщо знехтувати дисипацією в рівняннях (14) і (15) (це звичайне припущення для класичних умов Ренкіна–Гюгоніо), то параметр $G = 1$. Це видно з рівнянь (1) і (4) з припущенням $\varepsilon=0$. У цьому випадку маємо $K_1 = K_2$.

Для потоку без турбулентності та без підведення енергії рівняння (40) зводиться до

$$P = \frac{k - R^{-1}}{kR^{-1} - 1} = \frac{k - S}{kS - 1}, \quad (39)$$

що є добре відомою адіабатою Гюгоніо для чистих звичайних газів [24,25]. Тут $R^{-1} = S$.

Рівняння (38) має асимптоту для ρ_2/ρ_1 , виражену як

$$R = k. \quad (40)$$

За умови (40) стрибок тиску (38) йде до нескінченності.

Границя (40) існує при детонації лише в нестационарних сильно перетиснутих хвилях.

При детонації, яка спонтанно поширюється з постійною швидкістю, гранична густина, що прагне до нескінченності, дорівнює іншому значенню. Це значення буде визначено нижче.

Проаналізуємо поведінку рівняння Гюгоніо. Для цього представимо безрозмірні параметри в наступній формі

$$Eu = \frac{\bar{V}_1^2}{V_1^2} \frac{\rho_1 a_1^2}{\bar{p}_1} \frac{V_1^2}{a_1^2} = \gamma Tu_1^2 Ma_1^2 = k Ma_t^2, \quad Ma_1 = \frac{V_1}{a_1}, \quad Ma_t = \frac{\sqrt{V_1^2}}{a_1}, \quad Tu_1 = \sqrt{\frac{\bar{V}_1^2}{V_1^2}} \quad (41)$$

Результати розрахунків за рівнянням (38) показали, що збільшення тепловиділення (за умови відсутності турбулентності $Eu = 0$) призводить до збільшення стрибка тиску в порівнянні з випадком $Jo = 0$. В свою чергу, збільшення рівня турбулентності при відсутності тепловиділення збільшує скачок тиску за умови $S < 1$. Така тенденція пояснюється тим, що з ростом тепловиділення потік з вищим рівнем турбулентності має більшу кількість кінетичної енергії, яка перетворюється на скачок тиску під час проходження ударної хвилі.

Граничне стискання та швидкісні характеристики

Для визначення точки на кривій Гюгоніо, яка відповідає стійкій нормальній детонації з мінімальною швидкістю, скористаємось правилом відбору Жуге [3,4]. Ця точка відповідає точці на кривій Гюгоніо D , через яку проходить дотична, яка також проходить через точку Z згідно з правилом Жуге, швидкість детонації визначається нахилом дотичної до точки D за формулою $((P-1)(1-S))$. Той же нахил визначається похідною (dP/dS) . Отже, маємо наступне рівняння для визначення швидкості детонації

$$\frac{P-1}{1-S} = \frac{dP}{dS} = \frac{1+kP+Eu}{1-kS}. \quad (42)$$

Визначимо тангенс кута нахилу цієї дотичної. Для цього (за умови $G=1$) знайдемо з рівнянь (10) та (11)

$$V_1 = \sqrt{\frac{p_2 - p_1 + 2(\rho_2 - \rho_1)K_1 \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{P-1+(R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1}}. \quad (43)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{p_2 - p_1 + 2(\rho_2 - \rho_1)K_1 \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} = S \sqrt{\frac{P-1+(R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1}}. \quad (44)$$

З рівняння (43) знаходимо тангенс кута дотичної в точці D

$$\tan(\alpha) = -\frac{P_D - 1}{1 - S_D} = -\gamma Ma_1^2 + \frac{(R_D - 1)Eu}{1 - S_D}. \quad (45)$$

З іншого боку, цей самий тангенс визначається рівнянням (42)

$$\tan(\alpha) = \left(\frac{dP}{dS} \right)_D = \frac{1 + kP_D + Eu}{1 - \gamma S_D}. \quad (46)$$

Розв'язання системи рівнянь (45) та (46) дозволяє знайти координати точки D на кривій Гюгоніо

$$P_D = \frac{2\gamma(1 + \gamma Ma_1^2) - (2\gamma^2 + \gamma + 1)Eu + \sqrt{(2\gamma(1 + \gamma Ma_1^2))^2 + 4\gamma Eu(3\gamma + 1 - \gamma(\gamma + 3)Ma_1^2) + ((3\gamma + 1)Eu)^2}}{4\gamma(\gamma + 1)}, \quad (47)$$

$$S_D = \frac{2\gamma(1 + \gamma Ma_1^2) + (3\gamma + 1)Eu + \sqrt{(2\gamma(1 + \gamma Ma_1^2))^2 + 4\gamma Eu(3\gamma + 1 - \gamma(k + 3)Ma_1^2) + ((3\gamma + 1)Eu)^2}}{4\gamma(\gamma + 1)Ma_1^2}, \quad (48)$$

За відсутності турбулентності ($Eu=0$) рівняння (47) і (48) переходять у відомі співвідношення Жуге [3,4]. Розрахунки показали, що зі збільшенням ступеня турбулентності при спонтанній детонації збільшується величина стрибка тиску і зменшується ступінь стиснення.

$$P_D = \frac{1 + \gamma Ma_1^2}{1 + \gamma}, \quad (49)$$

$$S_D = \frac{1 + \gamma Ma_1^2}{(1 + \gamma)Ma_1^2}. \quad (50)$$

Границя рівняння (48) при швидкості, що прагне нескінченності, не залежить від ступеня турбулентності і дорівнює

$$R_D = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)_D = \frac{1 + \gamma}{\gamma}. \quad (51)$$

Це рівняння визначає граничне стискання у детонації, яке відповідає умові Жуге. Визначимо швидкість продуктів детонації. Для цього перетворюємо рівняння (42) наступним чином

$$\frac{P-1}{1-S} = \underbrace{\frac{1+kP}{1-kS}}_H + \frac{Eu}{1-kS} = \underbrace{\gamma \frac{P}{S}}_I + \frac{Eu}{1-kS} \quad (52)$$

При цьому у точці D похідні ізоентропи Пуассона (позначено літерою I у рівнянні (52)) і рівняння Гюгоніо (37) за відсутності турбулентності (позначено літерою H у рівнянні (52)) рівні [3,4].

Помножимо (52) на S^2 . Це дає

$$S^2 \frac{P-1}{1-S} = \gamma P S + \frac{Eu}{1-kS} S^2 = \gamma \frac{p_2}{\rho_2} \frac{\rho_1}{p_1} + \frac{Eu}{1-kS} S^2 = a_2^2 \frac{\rho_1}{p_1} + \frac{Eu}{1-kS} S^2. \quad (53)$$

Далі перетворюємо рівняння для швидкості продуктів детонації (44)

$$V_2^2 = S^2 \frac{P-1 + (R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1} = S^2 \frac{P-1}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1} + S^2 \frac{(R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1}. \quad (54)$$

Перепишемо це рівняння з урахуванням (53)

$$S^2 \frac{P-1}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1} + S^2 \frac{(R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1} = a_2^2 + \frac{Eu}{1-kS} S^2 \frac{p_1}{\rho_1} + S^2 \frac{(R-1)Eu}{1-S} \frac{p_1}{\rho_1}. \quad (55)$$

Порівняння (54) та (55) дозволяє знайти рівняння швидкості продуктів детонації

$$V_2^2 = a_2^2 + a_2^2 \frac{S}{\gamma P} \left(\frac{1}{1-kS} + \frac{R-1}{1-S} \right) Eu = a_2^2 \left(1 + \frac{kS - S - 1}{\gamma P(kS - 1)} Eu \right) \quad (56)$$

або в безрозмірному вигляді

$$Ma_2^2 = 1 + \frac{kS - S - 1}{\gamma P(kS - 1)} Eu. \quad (57)$$

У рівняннях (56) і (57) можна виключити параметр P за допомогою модифікованого рівняння Гюгоніо (38).

Рівняння (56) і (57) показують, що при нульовому рівні турбулентності продукти горіння течуть від фронту детонації з критичною (звуковою) швидкістю. Зі збільшенням ступеня турбулентності швидкість продуктів детонації зростає. Зрозуміло, що енергія турбулентних пульсацій сприяє збільшенню кінетичної енергії посередньої течії за детонаційною хвилею. Той самий ефект спостерігався у потоках з ударними хвилями без хімічних реакцій [17].

Висновки

У роботі розглянуто процес детонації у турбулентному потоці газу. Визначено закономірності зміни параметрів турбулентності під час переходу потоку через ударну хвилю. Отримано модифіковане рівняння Гюгоніо для детонації, яке враховує спільний вплив тепловиділення та рівня турбулентності.

Отримано рівняння визначення швидкості продуктів детонації. За нульового рівня турбулентності продукти горіння течуть від фронту детонації з критичною (звуковою) швидкістю. Зі збільшенням ступеня турбулентності швидкість продуктів детонації зростає. Вочевидь, енергія турбулентних пульсацій сприяє збільшенню кінетичної енергії посередньої течії за детонаційною хвилею. Той самий ефект спостерігався і в потоках з ударними хвилями без хімічних реакцій [17]. Показано, що тепловий ефект послаблює вплив турбулентності.

Визначено залежність, що дозволяє оцінити вплив тепловиділення та турбулентності на швидкість перед ударною хвилею. Показано, що тепловий ефект і турбулентність призводить до прискорення потоку перед ударною хвилею.

Робота профінансована в рамках програми наукових проектів НАН України (№ 6541230) «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок». Договір №7.9/25-П від 01.01.2025р. (1230). Проект: «Розвиток розподіленої енергетики на основі використання газотурбінних і газопоршневих технологій та місцевих альтернативних видів палива в період воєнного стану і відновлення України».

ЛІТЕРАТУРА

1. Urzay J. Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. Annual Review of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 50. P.593-627. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>
2. Ishii K., Kataoka H., Kojima T. Initiation and propagation of detonation waves in combustible high speed flows. Author links open overlay panel. 2009. Vol. 32, №2. P. 2323-2330. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.029>
3. Rankine W. J. M.. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbances. Philosophical Transactions of the Royal Society of London .1870. Vol.160. P. 277-288. <https://www.jstor.org/stable/109061>
4. 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 (in French). 1887. Vol. 57. P. 3–97
5. Hugoniot H. Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (deuxième partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (second part)] Journal de l'École Polytechnique. 1889. Vol.58. P. 1–125.
6. Jouguet J.C.E. Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz [On the propagation of chemical reactions in gases]. Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. 1905. Series 6.1. 347–425.
7. Jouguet J.C.E.. Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz [On the propagation of chemical reactions in gases].Journal de Mathématiques Pures et Appliquées (1906).Series 6.2. 5–85.
8. Shepherd J. E.. Detonation in gases. Preprint. In Proceedings of the Combustion Institute. 2009. Vol. 32. P. 83-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.006>
9. Hytovich R., Rising C., Morales A., Genova T., Berson J., Ahmed K. The effects of flame generated turbulence for turbulent-induced deflagration to detonation transition. Proceedings of the Combustion Institute. 2022. 34J. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.068>
10. Chambers J., Chin H.M., Poludnenko A.Y., Gamezo V.N., Ahmed K.A.: Spontaneous runaway of fast turbulent flames for turbulence-induced deflagration-to-detonation transition. Physics Fluids. 2022. Vol.34. 015114. <https://doi.org/10.1063/5.0078556>
11. Chin H., Chambers J., Poludnenko A., Gamezo V.N., Ahmed K.A. Chapman-Jouguet deflagration criteria and compressibility dynamics of turbulent fast flames for turbulence-induced deflagration-to-detonation transition. Physics Fluids. 2023. Vol.35. 066122. <https://doi.org/10.1063/5.0144662>
12. Iwata K., Suzuki S., Kai R., Kurose R. Direct numerical simulation of detonation–turbulence interaction in hydrogen/oxygen/argon mixtures with a detailed chemistry. Physics of Fluids. 2023. Vol.35. P. 046107. <https://doi.org/10.1063/5.0144624>
13. Wang H., Chen T. Chemical Engineering & Technology. Experimental and Numerical Study of the Impact of Initial Turbulence on the Explosion Behavior of Methane-Air Mixtures. First published. 2021. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000619>
14. 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.Vol. 10, №1 5. P.435-442. DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20
15. Ramos E., Storey B.D., Sierra F., Zúñiga R.A., Avramenko A.A. Temperature distribution in an oscillatory flow with a sinusoidal wall temperature. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, №22. P. 4929-4938. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.033>

16. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Oblique shock wave in turbulent flow. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2023. Vol. 48, №44. <https://doi.org/10.1515/jnet-2022-0093>
17. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Analytical simulation of normal shock waves in turbulent flow. *Phys. Fluids*. 2022. Vol. 34. P. 056101. <https://doi.org/10.1063/5.0093205>
18. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Shock Wave in van der Waals Gas. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2022. Vol. 47, №3. P. 255 – 267. doi: <https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099>
19. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Yu.Yu. Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. *Physics Fluids*. 2023. Vol. 35, №2. P. 026110. <https://doi.org/10.1063/5.0138331>
20. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y.Y. Detonation in van der Waals Gas. *Fluids*. 2023. Vol. 8, 296. – 10 p. <https://doi.org/10.3390/fluids8110296>
21. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Skitsko I.F. Shock waves in gas flows with nanoparticles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 12709 – 12719. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11483-5>
22. Zhang G., Kim H.D. 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. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0341-5>
23. Ligrani P.M., McNabb E.S., Collopy H., Anderson M., Marko S.M. Recent investigations of shock wave effects and interactions. *Advances in Aerodynamics*. 2020. Vol. 2, 4. <https://doi.org/10.1186/s42774-020-0028-1>
24. Çengel Y.A. Heat Transfer: A Practical Approach. Higher Education, 2nd ed., McGraw-Hill, New York. 2002. 871P.
25. Weigand B., Köhler J., Wolfersdorf J. Thermodynamik kompakt, 4., aktualisierte Auflage. ed, Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg. 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49703-6>

EFFECT OF FLOW TURBULENCE ON
DETONATION PROCESSESAvramenko A.A.¹, Tyrinov A.I.², Kovetska Yu.Yu.³,
Anastasiev D.V.⁴*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy
of Sciences, Kyiv 03680, Kapnist str., 2a*¹*Ukraine Corresponding Member of the NAS of Ukraine,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>*²*Dr. Sci., ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>*³*PhD, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2454-9113>*⁴*postgraduate*<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.2>

Recently, the study of the mechanisms of occurrence and propagation of detonation processes has been of particular interest. The aim of this work is to theoretically analyze the interaction of a turbulent gas flow with a normal detonation wave. For the first time, a simplified K- ϵ model was applied to analyze turbulence.

A modified Hugoniot detonation equation is derived for detonation, which takes into account the thermal effect and the level of flow turbulence. Thus, for the first time, the relationship between thermodynamic and gasdynamic processes in a detonation wave was demonstrated. At zero turbulence, combustion products flow from the detonation front at a critical (sonic) velocity. As the degree of turbulence increases, the velocity of detonation products also increases. It is evident that the energy of turbulent fluctuations contributes to an increase in the kinetic energy of the averaged flow behind the detonation wave. It has been shown that the thermal effect weakens the influence of turbulence.

A dependency has been established that allows evaluating the effect of heat release and turbulence on the velocity ahead of the shock wave. It has been demonstrated that both the thermal effect and turbulence lead to an acceleration of the flow ahead of the shock wave. It is also shown that when the flow passes through a shock wave, the value of turbulent viscosity is preserved.

References 25.

Key words: Detonation, shock wave, turbulent flow, heat release.

1. *Urzay J.* Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. Annual Review of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 50. P.593-627. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>

2. *Ishii K., Kataoka H., Kojima T.* Initiation and propagation of detonation waves in combustible high speed flows. Author links open overlay panel. 2009. Vol. 32, №2. P. 2323-2330. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.029>

3. *Rankine W. J. M.* On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbances. Philosophical Transactions of the Royal Society of London .1870. Vol.160. P. 277-288. <https://www.jstor.org/stable/109061>

4. *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 (in French). 1887. Vol. 57. P. 3–97

5. *Hugoniot H.* Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (deuxième partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (second part)] Journal de l'École Polytechnique. 1889. Vol.58. P. 1–125.

6. *Jouguet J.C.E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz [On the propagation of chemical reactions in gases]. Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. 1905. Series 6.1. 347–425.

7. *Jouguet J.C.E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz [On the propagation of chemical reactions in gases].Journal de Mathématiques Pures et Appliquées (1906).Series 6.2. 5–85.

8. *Shepherd J. E.* Detonation in gases. Preprint. In Proceedings of the Combustion Institute. 2009. Vol. 32. P. 83-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.006>

9. *Hytovick R., Rising C., Morales A., Genova T., Berson J., Ahmed K.* The effects of flame generated turbulence for turbulent-induced deflagration to detonation transition. Proceedings of the Combustion Institute. 2022. 34J. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.068>

10. *Chambers J., Chin H.M., Poludnenko A.Y., Gamezo V.N., Ahmed K.A.* Spontaneous runaway of fast turbulent flames for turbulence-induced deflagration-to-detonation transition. Physics Fluids. 2022. Vol.34. 015114. <https://doi.org/10.1063/5.0078556>

11. *Chin H., Chambers J., Poludnenko A., Gamezo V.N., Ahmed K.A.* Chapman-Jouguet deflagration criteria and compressibility dynamics of turbulent fast flames for turbulence-induced deflagration-to-detonation transition. Physics Fluids. 2023. Vol.35. 066122. <https://doi.org/10.1063/5.0144662>

12. Iwata K., Suzuki S., Kai R., Kurose R. Direct numerical simulation of detonation–turbulence interaction in hydrogen/oxygen/argon mixtures with a detailed chemistry. *Physics of Fluids*. 2023. Vol.35. P. 046107. <https://doi.org/10.1063/5.0144624>
13. Wang H., Chen T. Chemical Engineering & Technology. Experimental and Numerical Study of the Impact of Initial Turbulence on the Explosion Behavior of Methane-Air Mixtures. First published. 2021. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000619>
14. 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. Vol. 10, №1 5. P.435-442. DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20
15. Ramos E., Storey B.D., Sierra F., Zúniga R.A., Avramenko A.A. Temperature distribution in an oscillatory flow with a sinusoidal wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, №22. P. 4929-4938. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.033>
16. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Oblique shock wave in turbulent flow. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2023. Vol. 48, №44. <https://doi.org/10.1515/jnet-2022-0093>
17. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Analytical simulation of normal shock waves in turbulent flow. *Phys. Fluids*. 2022. Vol. 34. P. 056101. <https://doi.org/10.1063/5.0093205>
18. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Shock Wave in van der Waals Gas. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2022. Vol. 47, №3. P. 255 – 267. doi: <https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099>
19. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Yu.Yu. Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. *Physics Fluids*. 2023. Vol. 35, №2. P. 026110. <https://doi.org/10.1063/5.0138331>
20. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y.Y. Detonation in van der Waals Gas. *Fluids*. 2023. Vol. 8, 296. – 10 p. <https://doi.org/10.3390/fluids8110296>
21. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Skitsko I.F. Shock waves in gas flows with nanoparticles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 12709 – 12719. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11483-5>
22. Zhang G., Kim H.D. 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. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0341-5>
23. Ligrani P.M., McNabb E.S., Collopy H., Anderson M., Marko S.M. Recent investigations of shock wave effects and interactions. *Advances in Aerodynamics*. 2020. Vol. 2, 4. <https://doi.org/10.1186/s42774-020-0028-1>
24. Çengel Y.A. Heat Transfer: A Practical Approach. Higher Education, 2nd ed., McGraw-Hill, New York. 2002. 871P.
25. Weigand B., Köhler J., Wolfersdorf J. Thermodynamik kompakt, 4., aktualisierte Auflage. ed, Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg. 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49703-6>

Отримано 23.01.2025

Received 23.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 664.8.047

ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ОДЕРЖАННЯ КОМБІНОВАНИХ
КАРОТИНОВІСНИХ ПРОДУКТІВПетрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Граков Д.П.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: grakov.d@gmail.com<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>

У статті досліджено кінетику сушіння каротиновмісної комбінованої сировини на основі гарбуза та моркви за різних режимів зневоднення. Визначено, що комбіновані та ступеневі режими дають можливість скоротити процес сушіння майже в 1,5 – 2 рази зі збереженням кольору матеріалу. За результатами визначено, що оптимальні режими дають можливість зберегти високу кількість у каротиноїдів порошках. При цьому відбувається концентрація каротиноїдів у сухих порошках приблизно у 5 разів.

The paper investigates the drying kinetics of carotene-containing combined raw materials based on pumpkin and carrot under different dehydration regimes. It has been determined that combined and stepwise modes make it possible to reduce the drying process by almost 1.5-2 times while preserving the colour of the material. According to the results, it was determined that the optimal modes make it possible to preserve a high amount of carotenoids in powders. At the same time, the concentration of carotenoids in dry powders increases by about 5 times.

Бібл. 32, рис. 8, табл. 3.

Ключові слова: конвективне сушіння, інфрачервоне випромінювання, ефективні режими сушіння, каротиноїди, гарбуз, морква.

 W^c – вологість по відношенню до сухої маси, %; W – вологість по відношенню до загальної маси, %; u – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.; τ – час, хв; V – швидкість теплоносія, м/с; δ – товщина шару, мм.**Вступ**

Постановка проблеми. Збереження енергоресурсів є одним із завдань людства сьогодні. Тому зменшення їх на процеси переробки є досить актуальним. При цьому до складних енергоємних технологічних процесів належить сушіння. Сушіння, мабуть, найдавніший і найважливіший метод збереження їжі та овочів, який практикує людина [1, 2]. Процес сушіння включає тепло- та масообмін [3 - 5]. Сушіння, тобто видалення води, запобігає росту та виробленню мікроорганізмів, що спричиняє гниття; це мінімізує руйнівні реакції, спричинені вологою [2]. Також процес призводить до суттєвого зменшення ваги та об'єму, мінімізуючи витрати на пакування, зберігання та транспортування, а також забезпечує можливість зберігання продукту за температури навколишнього середовища [6]. Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість

кінцевого продукту [1, 7]. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв на процеси сушіння та дозволяють зберігати мікро- та макроеlementи у сухому продукті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі вітаміни та біологічно активні речовини, які забезпечились без змін, в харчовій сировині називають функціональними інгредієнтами [8]. Харчові продукти, які повноцінні, збагачені або покращені функціональними інгредієнтами називають функціональними харчовими продуктами або нутрицевтиками та можуть сприяти здоров'ю, окрім основної функції забезпечення основними поживними речовинами [9, 10].

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено класифікацією основних рослинних

функціональних інгредієнтів, які залишилися у сухих продуктах: антиоксидантні, фітоестрогенні, фолатовмісні та пребіотичні.

Найбільш поширеними є антиоксиданти. Антиоксиданти — це молекули, які достатньо стабільні, щоб віддавати електрони вільним радикалам, зокрема кисню, в подальшому нейтралізують його, таким чином зменшуючи його здатність до окислення [11]. Вони також затримують або пригнічують клітинне пошкодження головним чином завдяки своїй властивості поглинати вільні радикали [12]. Деякі антиоксиданти, включаючи глутатіон, убіхінол і сечову кислоту, виробляються під час нормального метаболізму в організмі [13]. Інші більш легкі антиоксиданти містяться в їжі. Хоча в організмі існує кілька систем ферментів, які поглинають вільні радикали, основними мікроелементами (вітамінами) антиоксидантами є каротиноїди, вітамін Е (α -токоферол) і вітамін С (аскорбінова кислота) [14]. Організм не може виробляти ці мікроелементи, тому вони повинні надходити з їжею.

Значний потенціал для прогресу з антиоксидантів у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості продемонстрували каротиноїди, завдяки своїй багатій поживній цінності та функціональними властивостями [15, 16]. Каротиноїди, клас терпеноїдних пігментів, головним чином відповідають за яскраво-жовтий, помаранчевий і червоний кольори квітів і плодів рослин [17, 18]. Найбільш поширеними представниками каротиноїдів в Україні є гарбуз та морква.

Гарбуз (*Cucurbita*) є загальною назвою сезонних плодів даного роду. Попит на гарбуз зростає з кожним роком, головним чином тому, що він менш калорійний зі значним вмістом харчових волокон, полісахаридів, пектинів, каротиноїдів і флавоноїдних пігментів, які набувають все більшого значення завдяки своїй антиоксидантній активності, мінералів (калій, кальцій, магній, натрій, залізо), вітамінів (А, С, В1, В2, В9) та інших речовин, що сприяють зміцненню здоров'я [19 - 21]. Найважливішою перевагою гарбуза є його низька калорійність, що пов'язано, насамперед, з високим вмістом води, яка становить приблизно 80% від загальної кількості в рослині [22].

Морква (*Daucus carota* L.) — коренеплід, що має значну економічну та харчову цінності, широко культивується в усьому світі через багатий вміст вітамінів, мінералів, клітковини та антиоксидантів. Морква відіграє вирішальну роль у раціоні людини, забезпечуючи її необхідними поживними речовинами, та-

кими як бета-каротин, що перетворюється на вітамін А, який має вирішальне значення для зору, імунної функції та здоров'я шкіри [23]. Гарбуз та морква відносяться до сезонних продуктів та мають терміни зберігання, які можливо збільшувати завдяки консервуванню, а саме сушінню. Сушіння є одним із найстаріших, природним і доцільним способом консервування завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах [16 - 25].

Авторами [26] у роботі розглянуто сушіння гарбуза та моркви у гібридній сушарці, яка використовує теплову енергію від сонячного випромінювання та гарячу воду, як підігрів дна камери. Сушіння відбувалось за температур 50, 60, та 70 °С. Ця технологія доцільна при сушінні в тропічному та субтропічному кліматі та за допомогою цього методу можна ефективно вирішити проблему сушіння в сезон дощів.

У роботі [27] розглянуто особливості сушіння та фізичні властивості шматочків гарбуза під час вібраційно-інфрачервоного, інфрачервоного та конвективного сушіння. Для досліджень були вибрані тайські гарбузи (*Cucurbita moschata*), які нарізали прямокутної форми розміром 2 см x 2 см x 0,5 см. При вібраційно-інфрачервоному та інфрачервоному сушінні для експериментів використовували різну інтенсивність інфрачервоного випромінювання 500Вт/м², 750Вт/м² і 1000 Вт/м².

Сушіння за допомогою вібраційно-інфрачервоного використовувало вібрацію зі швидкістю 750 об/хв, що є мінімально необхідним для перевертання шматочків гарбуза при рівномірному сушінні. Метод конвективного сушіння відбувався при температурі теплоносія 60°C і швидкістю 0,5 м/с.

Спосіб вібраційно-інфрачервоного сушіння продемонструвало найвищу швидкість сушіння (0,1 г води/г сухої речовини•хв) і найкоротший час сушіння (100 хв), при цьому ефективність сушіння залежала від інтенсивності інфрачервоного сушіння. Скибочки гарбуза, висушені в умовах вібраційно-інфрачервоного сушіння при середній інтенсивності ІЧ-променів 750 Вт/м², продемонстрували чудові властивості продукту. При цьому конвективне сушіння при низькій швидкості теплоносія має найнижчу тривалість процесу і становить 425 хв.

Авторами у роботі [28] виконані дослідження конвективного ротаційного та гібридно-ротаційного сушіння моркви (сорт Nantes) за допомогою мікрохвиль та ультразвуку за допомогою гібридної ротаційної сушарки.

Моркву промивали, очищали від шкірки та нарізали скибочками (товщиною 5 мм) за допомогою промислового кутера Hällde RG100 (Kista, Швеція). Було виконано 4 програми сушіння — один конвективний і три гібридні підходи. Дослідження оцінювало кінетику сушіння, споживання енергії та якість продукту. Використання ультразвуку збільшило швидкість сушіння на 13%, мікрохвиль на 112%, а мікрохвиль і ультразвук разом на 140%. Використання мікрохвиль зменшило споживання енергії на 30%, тоді як ультразвук призвело до незначного збільшення. Усі процеси призвели до значного зниження активності води. Ультразвук зменшив індекс різниці кольорів, тоді як мікрохвилі збільшили його порівняно з конвективним сушінням.

У роботі [29] було виконано дослідження якості зневоднених шматочків моркви та гарбуза, отриманих шляхом комбінованого сушіння з використанням часткового сублімаційного сушіння та сушіння гарячим повітрям. Загальний вміст каротиноїдів у двох овочах зазнав значного впливу параметрів сушіння. Деструкція каротиноїдів при зберіганні при різних температурах була меншою у зразках комбінованого сушіння. Овочі НАД показали усадку, затвердіння та погану регідратацію (25 та 28 хв у холодній воді, коефіцієнт регідратації 1:2,6 та 1:2,9 відповідно). Час сушіння та загальна енергія для обробки комбінованого сушіння були на 50% меншими, ніж для ліофілізованого, але подібні до висушених гарячим повітрям. Комбінований процес зневоднення є ефективним для отримання високоякісних сушених овочів.

Конвективне сушіння є одним кращих методів сушіння каротиновмісних матеріалів, але при цьому має переважно велику тривалість, яку для кращого збереження функціональних властивостей необхідно зменшувати. Тому метою роботи є дослідження комбінованих методів сушіння, для зменшення тривалості.

Матеріали та методи досліджень

Для збереження каротиновмісної складової були створені суміші на основі моркви та гарбуза. Тому для досліджень були використані гарбуз, морква, хурма та селера, які мили, натирали на промисловій овочерізці та змішували.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [30].

В теорії сушіння вологість матеріалу зазвичай розраховується відносно маси абсолютно су-

хого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною, а також є зручною для розрахунків [31]. Перехід від вологості W^c , розрахований по відношенні до маси сухої речовини матеріалу, до вологості W , розраховано до зальної маси, простий.

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q = q_{\text{вл}} - q_{\text{ср}},$$

де $q_{\text{вл}}$ — маса води, кг; $q_{\text{ср}}$ — маса сухої речовини, кг.

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси обчислюють за формулою, %:

$$W = \frac{q_{\text{вл}}}{q} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 — маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 — маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 — маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 — маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 — маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 — маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Формули переходу, %:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100,$$

$$W^c = \frac{W}{100 - W} \cdot 100,$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо *вологовміст* (питомий масовміст) матеріалу [31]:

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

Результати дослідження

Перед процесом сушіння була проведена підготовка сировини, тобто створення суміші у співвідношенні 1:1, а саме гарбузово-хурмова та морквяно-селерна.

Поснавання моркви з селерою дає стабілізацію каротиноїдів навіть на початку процесу безгіротермічної обробки на 11 – 23%. Очевидно, вже під час подрібнення

та перемішування відбувається стабілізація каротиноїдів за рахунок жиру, ефірних масел селери, білків і вітаміну С. Моркву та суміш морвяно-селерну обробляли таким чином, тобто селеру перемішували разом з подрібненою морквою, а також подрібнену моркву, обробляли гострою парою. Розглядаючи динаміку втрат каротиноїдів під час гідротермічної обробки морквяно-селерної спостерігаємо таку ж залежність як і в моркві. Селеру також потрібно бланшувати для запобігання ферментативного Браунінга. Поліфенолоксидаза несе пряму відповідальність за ферментативне потемніння і тому її потрібно інгибувати парою.

У таблиці 1 приведені дані про зміну каротиноїдів від умов підготовки сировини до сушіння під час сушіння [32].

Сама гідротермічна обробка майже не руйнує каротиноїди (табл. 1), ці мінімальні втрати обумовлені механічним руйнуванням хромопластів на лінії розрізу паренхіми моркви.

Найбільші втрати каротиноїдів, як видно з рис. 1 без підготовки сировини до сушіння 44% (поз. 1). Існуюча технологія гідротермічної обробки (поз. 2) дає втрати до 25%. Розроблені нами режими бланшування моркви дозволили зменшити втрати каротиноїдів під час сушіння до 12% (поз. 3). Купажування каротиновмісної сировини та обробка парою протягом 5 хв дає можливість отримати найкращі результати при яких втрати становлять

4,4% (поз. 4). Отже, оптимальними умовами підготовки каротиновмісної сировини є купажування цієї сировини та обробка парою 5 хв. З огляду на те, що гідротермічна обробка відбувається з певними енерговитратами, немає сенсу збільшувати час обробки.

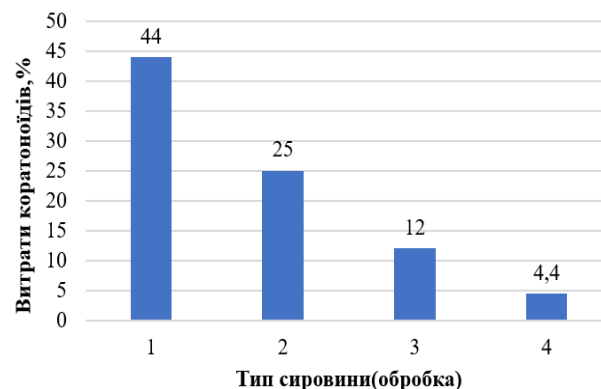


Рис. 1. Гідротермічна обробка антиоксидантної сировини: 1 – морква без гідротермічної обробки; 2 – існуюча технологія гідротермічної обробки моркви; 3 – гідротермічна обробка моно сировини; 4 – гідротермічна обробка селеро-морквяної сировини

Fig. 1. Hygrothermal treatment of antioxidant raw materials: 1 - carrots without hygrothermal treatment; 2 - existing technology of hygrothermal treatment of carrots 3 - hygrothermal treatment of mono raw materials; 4 - hygrothermal treatment of celery-carrot raw materials

Табл. 1. Підготовка антиоксидантної сировини до сушіння (гідротермічна обробка)

Table 1. Preparation of antioxidant raw materials for drying (hygrothermal treatment)

Сировина	Умови гідротермічної обробки		Втрати каротиноїдів, %	
	Час обробки, хв.	Температура обробки, °C	під час гідротермічної обробки	під час сушіння при температурі 70°C
Морква	0	—	—	44
	2	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,8 / 1,0	19,8 / 13,5
	3	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,7 / 2,1	11,0 / 12,1
	5	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,6 / 2,5	11,5 / 17,4
	7	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,7 / 3,6	15,6 / 26,9
	10	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,8 / 3,8	25,5 / 35,4
Морквяно-селерна суміш	0	—	—	33,4
	2	(пара 98°C)	0,6	16,8
	3	(пара 98°C)	0,5	5,1
	5	(пара 98°C)	0,6	5,7
	7	(пара 98°C)	0,7	12,3
	10	(пара 98°C)	0,6	21,1

Гарбуз та суміш на його основі не бланшували, а досліджували в сирому вигляді.

Дослідження сушіння проводили до вологості матеріалу $7 \pm 1\%$. Для гарбуза та суміші на його основі товщинна шару дорівнювала 5 мм, а для моркви та суміші на її основі 10 мм.

На рисунку 2 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння гарбуза. З рисунку 2 видно, збільшення температури теплоносія з 65°C до 100°C скорочує час сушіння гарбуза на 35%, а швидкість зростає в 1,5 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100°C призводить до погіршення якості сушеного гарбуза, а саме потемніння матеріалу та підгорілий присмак.

Далі були виконані дослідження гарбузово-хурмяної суміші за режимами сушіння $65, 100, 100/65, ^\circ\text{C}$ та комбінованим $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$, швидкість теплоносія $3,0\text{ м/с}$.

На рис. 3 представлені зміна вологовмісту та температурні криві сушіння гарбузово-хурмяної суміші. Як видно з рисунку 2 найбільша тривалість сушіння у режиму 65°C та становить 131 хв. Найменша тривалість при 100°C та становить 73 хв, але при цьому матеріал має потемніння та пригорілий присмак.

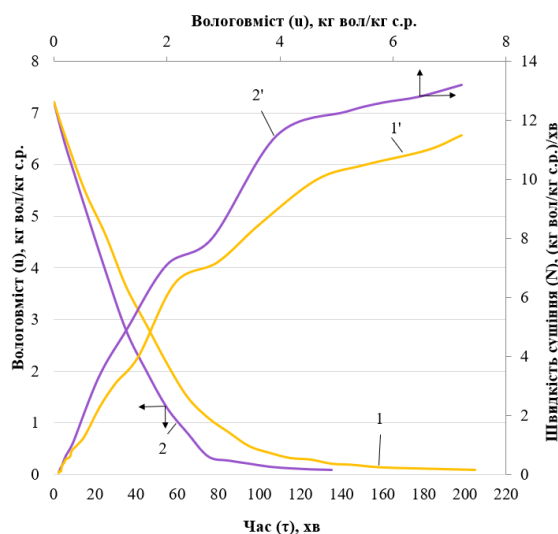


Рис. 2. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') гарбуза в шарі $\delta \approx 5\text{ мм}$:

1 – 65°C , 3 м/с ; 2 – 100°C , 3 м/с

Fig. 2. Changes in moisture content (1, 2) and drying rate (1', 2') of pumpkin in a layer $\delta \approx 5\text{ mm}$:

1 – 65°C , 3 m/s ; 2 – 100°C , 3 m/s

Для ступеневого режиму $100/65^\circ\text{C}$ та комбінований $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$ на початку процесу матеріал доводили до температури 58°C , після чого зменшували температуру та вмикали інфрачервоні лампи для подальшого сушіння за температури 65°C . Ці режими мають нижчу тривалість порівняно з 65°C та становлять 118хв для $100/65^\circ\text{C}$ та 117 хв для $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$.

На початку дослідження за комбінованим режимом $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$ працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м^2 та теплоносії 65°C при після досягнення температури матеріалу 58°C вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до $50,7^\circ\text{C}$, далі вона підіймається до $64,36^\circ\text{C}$. За ступеневим режимом $100/65^\circ\text{C}$ матеріал сушили при температурі теплоносія 100°C до температури матеріалу 58°C . Потім температуру теплоносія зменшували до 65°C , при цьому температура матеріалу збільшилась до $58,44^\circ\text{C}$, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до $48,16^\circ\text{C}$, та подальшому збільшувалася до $62,6^\circ\text{C}$.

На рис. 4 представлена зміна швидкості сушіння гарбузово-хурмової суміші. Як видно з рис. 4 максимальна швидкість сушіння за режимом 100°C і

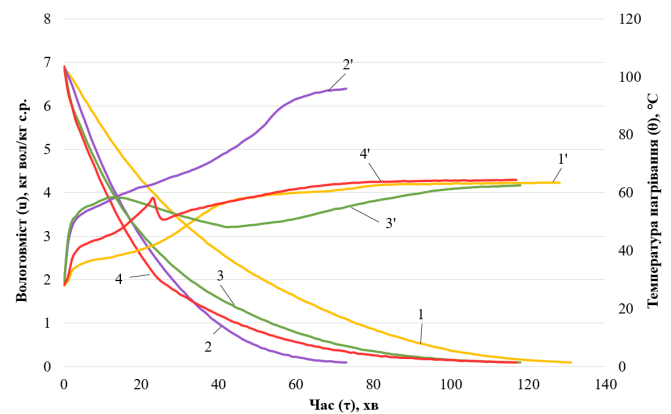


Рис. 3. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') суміші на основі гарбуза та хурми, товщина шару $\delta \approx 5\text{ мм}$:

1 – 65°C , 3 м/с ; 2 – 100°C , 3 м/с ; 3 – $100/65^\circ\text{C}$, 3 м/с ; 4 – $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$, 3 м/с

Fig. 3. Changes in moisture content (1, 2, 3, 4) and temperature within the layer (1', 2', 3', 4') of a mixture based on pumpkin and persimmon, layer thickness $\delta \approx 5\text{ mm}$:

1 – 65°C , 3 m/s ; 2 – 100°C , 3 m/s ; 3 – $100/65^\circ\text{C}$, 3 m/s ; 4 – $3800\text{W/m}^2 + 65^\circ\text{C}$, 3 m/s

становить 25,8 %/хв, найменша за режимом 65°C – 14,3%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м² +65 °C має максимальну швидкість сушіння 22,6 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості з 11,5%/хв до 6,24%/хв і потім іде поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 °C максимальна швидкість сушіння 24,8%/хв.

На рис. 5 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння моркви. З рисунку 5 видно, при збільшенні температури теплоносія з 70 °C до 100 °C скорочує час сушіння гарбуза у 1,95 разів, при цьому швидкість зростає в 1,73 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100 °C призводить до погіршення якості сушеної моркви, а саме потемніння матеріалу та підгорілого присмаку.

Далі були виконані дослідження морквяно-селерної суміші за режимами сушіння 60, 70, 80, 100, 100/70 °C швидкість теплоносія 3,5 м/с. Кінетика процесу сушіння морквяно-селерної суміші представлена на рис. 6.

З збільшенням температури теплоносія зменшується тривалість сушіння, так при температурі 60°C тривалість сушіння 125 хв., а вже при температурі 70°C – 80 хв., тобто зменшення тривалості складає 1,56 раз. Подальше збільшення температури на 10°C до температури 80°C приводить до зменшення тривалості

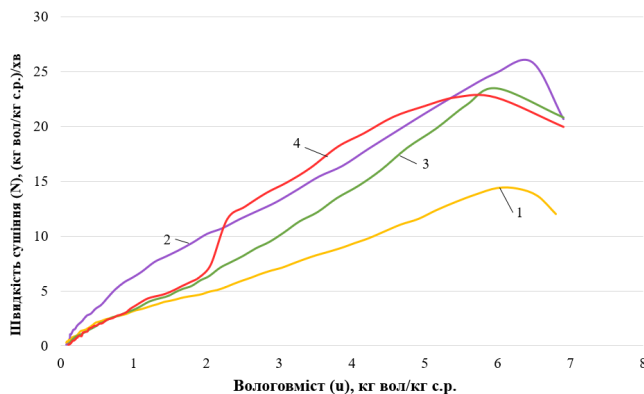


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) суміші на основі гарбуза та хурми в шарі $\delta \approx 5$ мм:

1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с;
4 – 3800 Вт/м² + 65 °C, 3 м/с

Fig. 4. Changes in the drying rate (1, 2, 3, 4) of a mixture based on pumpkin and persimmon in a layer $\delta \approx 5$ mm:

1 – 65 °C, 3 m/s; 2 – 100 °C, 3 m/s; 3 – 100/65 °C, 3 m/s;
4 – 3800 W/m² + 65 °C, 3 m/s

в 1,15 раз. При температурі 100°C сушіння морквяно-селерної суміші проходить найшвидше за 58 хв (рис. 7). При ступеневому режимі інтенсивність процесу досягається наступним чином: на початку сушіння на протязі 30 хв температура теплоносія складає 100 °C,

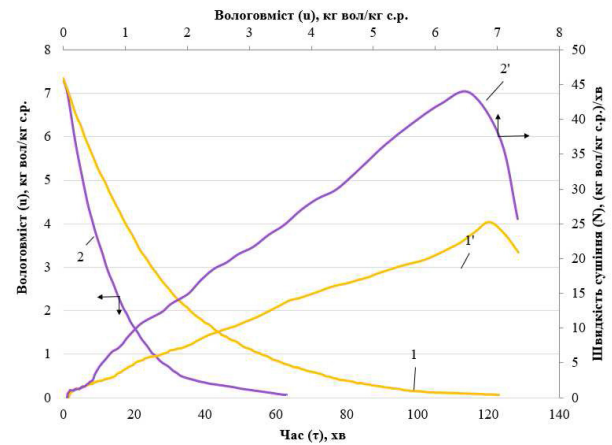


Рис. 5. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') моркви в шарі $\delta \approx 10$ мм:

1 – 70 °C, 3,5 м/с; 2 – 100 °C, 3,5 м/с

Fig. 5. Changes in moisture content (1, 2) and drying rate (1', 2') of carrots in a layer $\delta \approx 10$ mm: 1 – 70 °C, 3.5 m/s; 2 – 100 °C, 3.5 m/s

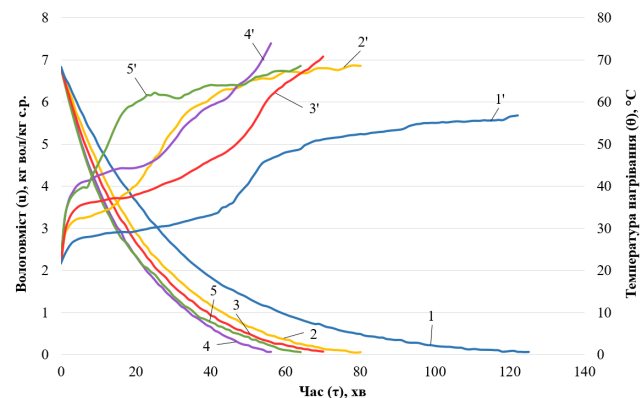


Рис. 6. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4, 5) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4', 5') морквяно-селерної суміші в шарі $\delta \approx 10$ мм:

1 – 60 °C, 3,5 м/с; 2 – 70 °C, 3,5 м/с; 3 – 80 °C, 3,5 м/с;
4 – 100 °C, 3,5 м/с; 5 – 100/70 °C, 3,5 м/с

Fig. 6. Changes in moisture content (1, 2, 3, 4, 5) and temperature within the layer (1', 2', 3', 4', 5') of carrot-celery mixture in a layer $\delta \approx 10$ mm:

1 – 60 °C, 3.5 m/s; 2 – 70 °C, 3.5 m/s; 3 – 80 °C, 3.5 m/s;
4 – 100 °C, 3.5 m/s; 5 – 100/70 °C, 3.5 m/s

потім коли температура матеріалу підвищується температуру знижують до 70 °С і підтримують на такому рівні до кінця процесу сушіння. Тривалість процесу за ступневим режимом 100/70 °С зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °С.

На кривих швидкості сушіння видно, що процес сушіння проходить наступні етапи: нагрівання до максимального значення швидкості сушіння і період падаючої швидкості сушіння до кінцевої вологості 6..10%. Максимальне значення швидкості при сушінні морквяно-селерної суміші настає при вологовміст 5,8-6,7 кг вол./кг с.р. % (рис. 7).

Максимальна швидкість сушіння морквяно-селерної суміші при температурі 100°С – 35,1%/хв., що у 1,7 разів більше за максимальну швидкість при температурі 60°С.

Вміст каротиноїдів в залежності від стану сировини представлено в таблиці 2. Як видно з таблиці 2 концентрація каротиноїдів в порошках збільшується приблизно у 5 разів, що пояснюється зменшенням вологи та концентрацією сухих речовин.

Порівнюючи якісні показники композиційних антиоксидантних сумішей за вмістом каротиноїдів, можна зробити висновок, що вони зберігають краще каротиноїди, ніж морквяний порошок після гіротермічної обробки на 6,3 – 9,6% (табл. 3).

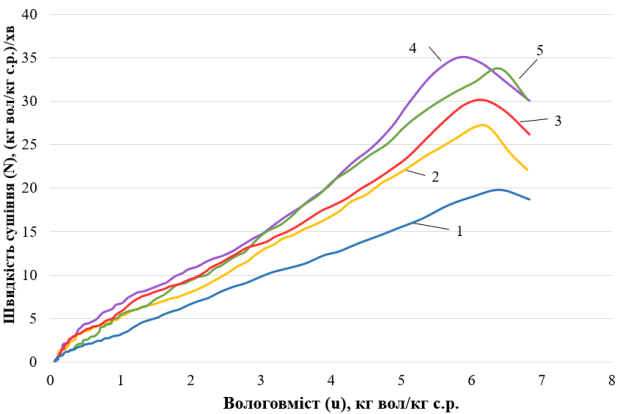


Рис. 7. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4, 5) морквяно-селерної суміші в шарі $\delta \approx 10$ мм:
1 – 60 °С, 3,5 м/с; 2 – 70 °С, 3,5 м/с; 3 – 80 °С, 3,5 м/с;
4 – 100 °С, 3,5 м/с; 5 – 100/70 °С, 3,5 м/с
Fig. 7. Changes in the drying rate (1, 2, 3, 4, 5) of carrot-celery mixture in a layer $\delta \approx 10$ mm:
1 - 60 °C, 3.5 m/s; 2 - 70 °C, 3.5 m/s; 3 - 80 °C, 3.5 m/s;
4 - 100 °C, 3.5 m/s; 5 - 100/70 °C, 3.5 m/s

Проведені дослідження впливу температури теплоносія на збереження каротиноїдів показало, що найбільш оптимальна температура сушіння морквяно-селерної суміші, виходячи з якісних характеристик, складає 70°С (табл. 3).

Збільшення температури теплоносія до 80°С зменшить тривалість сушіння на 10 хв., при цьому також зменшується збереження каротиноїдів в порівнянні з температурою 70°С на 4,5%. Підвищення температури до 100°С призводить до істотного зменшення каротиноїдів і становить 33,2%.

Найкращі результати збереження каротиноїдів отримані при тепловому режиму сушіння 70 °С і становлять 90 – 93%. Ступінчастий режим сушіння забезпечує збереження каротиноїдів на рівні 87 – 90%. При цьо-

Таблиця 2. Вміст каротиноїдів в залежності від виду каротиновмісної сировини

Table 2. Carotenoid content depending on the type of carotene-containing raw materials

Вид сировини	Сировина	Волога, %	Сума каротиноїдів, мг %
Морква	Свіжа морква	85,0	19,2
	Порошок із моркви	4,0	139,7
Гарбуз	Свіжий гарбуз	86,3	2,6
	Порошок із гарбуза	8,0	19,5

Таблиця 3. Вплив температури теплоносія на збереження каротиноїдів в антиоксидантних сумішах на основі моркви

Table 3. Influence of coolant temperature on the preservation of carotenoids in carrot-based antioxidant mixtures

Назва антиоксидантного порошку	Температура теплоносія, °С	Каротиноїди (% збереження)
Морквяний (після гіротермічної обробки)	60	84,1
	70	88,3
	80	84,6
	100	21,5
Морквяно-селерний	60	87,7
	70	95,6
	80	91,1
	100	33,2

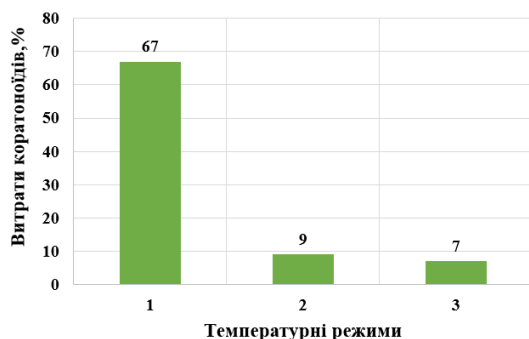


Рис. 8. Втрати каротиноїдів у морквяно-селерної суміші в залежності від режиму сушіння :

1 – 100 °C; 2 – 100/70°C; 3 – 70°C

Fig. 8. Loss of carotenoids in carrot-celery mixture depending on the drying mode:

1 - 100 °C; 2 - 100/70 °C; 3 - 70 °C

му антиоксидантна суміш на вигляд за кольором не відрізняється від початкової сировини. Навіть різниця в 3% збереження каротиноїдів між режимами 70 та 100/70°C, все ж таки надає перевагу ступінчатому режиму з огляду на значну інтенсифікацію процесу сушіння.

Висновки

Досліджено кінетику сушіння гарбуза, моркви та сумішей на їх основі, а саме гарбузово-хурм'яного та морквяно-селерного. Результати показують, що для сушіння гарбузово-хурм'яного порошку доцільно використання комбінованого 3800Вт/м² +65 °C та ступеневого режиму 100/65 °C, дають можливість скоротити тривалість процесу сушіння у 1,11 разів порівняно з режимом 65 °C, та зберегти яскравий оранжевий колір в порівнянні з режимом 65 °C.

Для сушіння морквяно-селерного порошку доцільно також використовувати ступеневий режим 100/70 °C за якого тривалість процесу зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °C.

За результатами визначено, що оптимальні режими дають зберегти високу кількість каротиноїдів порошків. Також сушіння дає можливість концентрувати каротиноїди у сухих порошках приблизно у 5 разів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Doymaz L. Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.
2. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

3. Adeboye O.C., Oputa C.O. Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. Journal of Agriculture, 1996, 18 (1/2), 1-9.

4. Bamire A.S., Oke J.T. Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. Journal of Vegetable Crop Production, 2003, 9, 11-18.

5. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В. Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. Теплофізика та Теплоенергетика, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>

6. Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S. Development of an okra slicing device, Journal of Food Science and Technology, 2007, 44 (4), 426-429.

7. Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C. Food dehydration. In D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.

8. Essa M.M., Bishir M., Bhat A. et al. Functional foods and their impact on health. J Food Sci Technol, 2023, 60, 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>.

9. Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R. Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals, 2025, 227-254.

10. Zannou O., Oussou K. F., Chabi I. B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al. Phytochemical and nutritional properties of sumac (Rhus coriaria): a potential ingredient for developing functional foods. Journal of Future Foods, 2025, 5(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.

11. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. Pharmacognosy reviews, 2010, 4(8), 118. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>.

12. Halliwell B. How to characterize an antioxidant-An update. Biochem Soc Symp, 1995, 61, 73–101. doi: 10.1042/bss0610073

13. Shi HL, Noguchi N, Niki N. Comparative study on dynamics of antioxidative action of α- tocopheryl hydroquinone, ubiquinol and α- tocopherol, against lipid peroxidation. Free Radic Biol Med, 1999, 27, 334–46. doi: 10.1016/s0891-5849(99)00053-2

14. Levine M, Ramsey SC, Daruwara R. Criteria and recommendation for Vitamin C intake. JAMA, 1991, 281, 1415–23. doi: 10.1001/jama.281.15.1415.

15. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, *Nutrients*, 2019, 11, 1093.
16. Петрова Ж.О., Новікова Ю.П., Слободянюк К.С., Граков О.П., Коваль І.О. Переробка хурми (*Diospyros kaki* L.) сушінням. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19-29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
17. Sun T, Rao S, Zhou X, Li L. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Mol Horti*, 2022, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
18. Sun Y, Hu P, Jiang Y et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across *Gloriosa* varieties. *BMC Plant Biol*, 2025, 25, 66. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y>
19. Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA. Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 2025, 6(1), 87-102.
20. Al-Anoos I, El-dengawy R, Hasanin H. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2015, 2(2), 1-4.
21. Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2014, 1(07), 1091-1097.
22. Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M. The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 175, 114469.
23. Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T. Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. *Tropical Agroecosystems (TAEC)*, 2024, 5(2), 78-81. <http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81>
24. Hyun J.-E. et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) Stored at Various Temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
25. Снежкін Ю.Ф., Шанар Р.О. Енергоефективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2020, 42(2), 5-17. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.1>
26. Phoosomma P., Korbuakaew K. Innovative Hybrid Food Processing Drying Chambers. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2024, vol. 11, no. 12, pp. 302-307. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P128>
27. Jongyingcharoen J. S., Naweera W., Sangruangnak S., Assawadejmethakul A. Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. In *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 2025,. Vol. 150, p. 03001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515003001>
28. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and Ultrasound Assisted Rotary Drying of Carrot: Analysis of Process Kinetics and Energy Intensity. *Applied Sciences*, 2024, 14(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app142210676>
29. Kumar H. P., Radhakrishna K., Nagaraju P. K., Rao D. V. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2001, 25(6), 447-460. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00472.x>
30. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
31. Ткаченко С. Й., Снівак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.
32. Снежкін Ю.Ф. Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Гідротермічна обробка функціональної. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 2012, вип. 41, т.1, 13 – 18.

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN THE PRODUCTION OF COMBINED CAROTENE-CONTAINING PRODUCTS

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Grakov D.P.²**, PhD student

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, , grakov.d@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>

Today, the world is trying to solve the problem of processing food plant material using existing drying methods to preserve biologically active substances. At the same time, drying is a complex energy-intensive process. And in the future, the problem of reducing energy consumption for drying processes arises. Therefore, there is an urgent need to create and implement modern energy-efficient thermal technologies that reduce energy consumption for drying processes and allow retaining micro- and macroelements in the dry product. A sufficient amount of micro- and macronutrients in foods that enrich the human body can reduce the risk of chronic diseases, improve physical health and mental well-being.

Carotenoids, which are classified as antioxidants, are the most common biologically active substances. They represent a significant potential in the food, cosmetics and pharmaceutical industries. Carotenoids are a class of terpenoid pigments that are mainly responsible for the bright yellow, orange and red colours of plant fruits and flowers.

The most common carotenoids in Ukraine are pumpkin and carrot. They are widely cultivated around the world due to their rich content of vitamins, minerals, fibre and antioxidant properties. Pumpkin and carrots are seasonal products and have a shelf life that can be extended by preservation, namely drying.

Convective drying is one of the best methods for drying carotene-containing materials, but it has a predominantly long duration, which must be reduced to better preserve functional properties. Therefore, **the aim of this work** is to study combined drying methods to reduce the duration.

In this work, the drying of pumpkin, carrot and mixtures based on them, namely pumpkin-persimmon and carrot-celery, was studied on an experimental convective stand.

The results show that for drying pumpkin-persimmon powder, it is advisable to use a combined 3800W/m² +65 °C and a step mode of 100/65 °C, which make it possible to reduce the drying process duration by 1.11 times compared to the 65 °C mode and preserve a bright orange colour compared to the 100 °C mode. For drying carrot and celery powder, it is also advisable to use a step mode of 100/70 °C, at which the process duration is reduced by 1.92 times compared to 60 °C.

According to the results, it was determined that the optimal modes make it possible to maintain a high amount of carotenoids in powders. At the same time, the concentration of carotenoids in dry powders increases by about 5 times.

Key words: convective drying, infrared radiation, efficient drying modes, carotenoids, pumpkin, carrot.

References 32, figure 8, table 3.

1. Doymaz L. Drying behavior of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, 161-165.
2. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
3. Adeboye O.C., Oputa C.O. Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. *Journal of Agriculture*, 1996, 18 (1/2), 1-9.
4. Bamire A.S., Oke J.T. Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. *Journal of Vegetable Crop Production*, 2003, 9, 11-18.
5. Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V. Intensyvni sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnyy ta kombinovanyy enerhopidvedenniam [Intensive methods of drying apple slices with convective and combined energy supply]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1> (in Ukr.).
6. Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S. Development of an okra slicing device, *Journal of Food Science and Technology*, 2007, 44 (4), 426-429.
7. Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C. Food dehydration. In D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.
8. Essa M.M., Bishir M., Bhat A. et al. Functional foods and their impact on health. *J Food Sci Technol*, 2023, 60, 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>.
9. Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R. Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. *Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals*, 2025, 227-254.

10. Zannou O., Oussou K. F., Chabi I. B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al. Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 2025, 5(1), 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.
11. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, 2010, 4(8), 118. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>.
12. Halliwell B. How to characterize an antioxidant—An update. *Biochem Soc Symp*, 1995, 61, 73–101. doi: 10.1042/bss0610073
13. Shi HL, Noguchi N, Niki N. Comparative study on dynamics of antioxidative action of α -tocopheryl hydroquinone, ubiquinol and α -tocopherol, against lipid peroxidation. *Free Radic Biol Med*, 1999, 27, 334–46. doi: 10.1016/s0891-5849(99)00053-2
14. Levine M, Ramsey SC, Daruwara R. Criteria and recommendation for Vitamin C intake. *JAMA*, 1991, 281, 1415–23. doi: 10.1001/jama.281.15.1415.
15. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, *Nutrients*, 2019, 11, 1093.
16. Petrova Zh.O., Novikova Yu.P., Slobodianiuk K.S., Hrakov O.P., Koval I.O. Pererobka khurmy (*Diospyros kaki* L.) sushinniam [Processing of persimmon (*Diospyros kaki* L.) by drying]. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19–29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955> (in Ukr.).
17. Sun T, Rao S, Zhou X, Li L. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Mol Hort*, 2022, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
18. Sun Y., Hu P., Jiang Y. et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across *Gloriosa* varieties. *BMC Plant Biol*, 2025, 25, 66. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y>
19. Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA. Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 2025, 6(1), 87–102.
20. Al-Anoos I, El-dengawy R, Hasanin H. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2015, 2(2), 1–4.
21. Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2014, 1(07), 1091–1097.
22. Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M. The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 175, 114469.
23. Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T. Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. *Tropical Agroecosystems (TAEC)*, 2024, 5(2), 78–81. <http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81>
24. Hyun J.-E. et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) Stored at Various Temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
25. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. Enerhoefektyvne obladnannia dlia znevodnennia termolabilnykh materialiv [Energy-efficient equipment for dehydration of thermolabile materials.]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2020, 42(2), 5–17. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.1> (in Ukr.).
26. Phoosomma P., Korbuakaw K. Innovative Hybrid Food Processing Drying Chambers. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2024, vol. 11, no. 12, pp. 302–307. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P128>
27. Jongyingcharoen J. S., Naweera W., Sangruangnak S., Assawadejmethakul A. Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. In *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 2025. Vol. 150, p. 03001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515003001>
28. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and Ultrasound Assisted Rotary Drying of Carrot: Analysis of Process Kinetics and Energy Intensity. *Applied Sciences*, 2024, 14(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app142210676>
29. Kumar H. P., Radhakrishna K., Nagaraju P. K., Rao D. V. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2001, 25(6), 447–460. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00472.x>
30. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159–166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
31. Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu. Sushylni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk [Drying processes and installations. Study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2007. 76 s. (in Ukr.).
32. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Paziuk V.M. Hidrotermichna obrobka funktsionalnoi [Hydrothermal treatment of functional]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii*, 2012, 41, 1, 13 – 18. (in Ukr.).

Отримано 30.01.2025

Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 66.021: 532.528

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНІЦІЮВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ У ПУЛЬСАЦІЙНОМУ ЕКСТРАКТОРІ З КОМБІНОВАНИМ ГІДРОДИНАМІЧНИМ ПРИСТРОЄМ

Ободович О.М.¹, д-р техн. наук, Іваницький Г.К.², д-р техн. наук, Гоженко Л.П.³, канд. техн. наук, Целень Б.Я.⁴, канд. техн. наук, Недбайло А.Є.⁵, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, г. н. с., проф., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проф., с. н. с., пр-т Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна;

³Інститут технічної теплофізики НАН України, пр. н. с., с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, gergey4@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, пр. н. с., с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.4>

Аналітичні дослідження проведено з метою визначення додаткових способів інтенсифікації кавітаційних ефектів у пульсаційному екстракторі, який працює в режимі кавітаційного реактора. Розглянуто принцип роботи пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм, в якому ініціюється потужний комплекс кавітаційних механізмів, що дозволяє обробляти різноманітну сировину з широким спектром властивостей при порівняно невеликих енергозатратах.

Analytical studies were carried out with the aim of determining additional methods of intensification of cavitation effects in a pulsation extractor operating in the mode of a cavitation reactor. The principle of operation of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device is considered, in which a powerful complex of cavitation mechanisms is initiated, which allows processing a variety of raw materials with a wide range of properties with relatively low energy consumption.

Бібл. 15, рис. 3

Ключові слова: пульсаційний екстрактор, гідродинамічна кавітація, сопло Вентурі, моделювання, енергоефективність.

P – тиск;

T – температура;

τ – час;

max – максимальне значення;

min – мінімальне значення;

L – довжина;

c – швидкість;

R – радіус;

PBT – ресивер високого тиску;

PNT – ресивер низького тиску.

Індекси:

0 – початкове значення;

a – атмосферний;

sat – насичений;

comp – компресор;

vac – вакуум;

l – рідина;

ac – акустична;

b – бульбашка.

Вступ. Вирішення актуальної проблеми створення ефективних фітопрепаратів, біологічно-активних добавок, продуктів функціонального призначення пов'язано з розробками і широким впровадженням сучасних промислових енергоефективних екстракційних способів переробки сировини. У сучасних способах інтенсифікації

процесу екстракції: ультразвукових, електроімпульсних, вібраційних [1 – 3] і т. п., використовуються фізико-хімічні ефекти акустичної або гідродинамічної кавітації [4, 5], що сприяє пришвидшенню процесів екстракції, забезпечуючи при цьому більший вихід цільових речовин [6]. Періодична зміна тиску при стисканні та

розрідженні покращує проникнення екстрагента в матеріал (частинку сировини) з наступним його виходом з матеріалу. Ініціювання динамічних ефектів кавітації сприяє розриву клітинних структур, що прискорює процес переходу цільових речовин в екстрагент за рахунок їх вимивання. Разом з тим в промисловості використання більшості подібних методів недоцільне, насамперед, з точки зору надзвичайно високих енергетичних витрат. У деяких випадках широко використовувані на сьогодні методи роторно-пульсаційної обробки з використанням гідродинамічної кавітації не практичні у застосуванні через специфічні абразивні та реологічні показники оброблюваної сировини.

Постановка проблеми. Розроблені в ІТТФ НАН України на основі принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [7] пульсаційні диспергатори різної модифікації широко використовуються в різних виробництвах як перемішувальні пристрої, гомогенізатори, емульгатори та екстрактори [4, 8 – 10]. Проте, проблема досліджень інтенсифікації процесу екстракції та розроблення енергоефективного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм залишається актуальною.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Дослідження проведено з метою вибору раціональної конструкції та оптимальних режимів роботи пульсаційного екстрактора для максимальної реалізації в ньому кавітаційних ефектів. У цій роботі розглядається принцип роботи ефективного пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм, в якому ініціюється широкий комплекс кавітаційних механізмів і який дозволяє обробляти сировину з широким спектром структурно-механічних і реологічних характеристик при порівняно невеликих енерговитратах. Завдання досліджень полягає у з'ясуванні основних динамічних ефектів у пульсаційному екстракторі з комбінованим гідродинамічним пристроєм, отриманні залежності зміни тиску в рідині з часом, залежності зміни з часом розміру бульбашок кавітаційного кластера та імпульсів тиску при кавітаційному захопленні бульбашок кластера у цих зонах.

Аналіз кавітаційних механізмів. Реалізація ефектів кавітації в різних типів пристроях є одним з ефективних способів керування гідродинамічними, термічними, хімічними процесами, що відбуваються як на макро, так і нанорівні. У теорії дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) кавітація розглядається як жорсткий механізм, який забезпечує в дискретних локальних точках оброблюваного середовища високу питому потужність в імпульсі при мінімальних витратах введеної

енергії [7]. Для ініціювання кавітації необхідно, щоб в об'ємі рідини з тиском p_{l0} і температурою T_l тиск швидко знизився від p_{l0} до $p_{l1} < p_{sat}(T_l)$, а потім різко піднявся до значення $p_{l2} > p_{sat}(T_l)$, де $p_{sat}(T_l)$ – тиск насиченої пари. Виділена в імпульсі питома потужність тим вища, чим швидше відбудеться скидання з наступним підвищенням тиску. Критерії ефективності кавітаційного впливу, сформовані на основі принципу ДІВЕ, можна представити у вигляді: $|p_{l0} - p_{l1}| / \Delta\tau_{0-1} \rightarrow \max$, і $|p_{l2} - p_{l1}| / \Delta\tau_{1-2} \rightarrow \max$ [7]. При розробці ефективних кавітаційних реакторів, у тому числі й із застосуванням комбінованих гідродинамічних пристроїв, обов'язково потрібно враховувати ці критерії ефективності кавітаційного впливу.

Слід зазначити, що для прискорення внутрішнього переносу не обов'язково виконувати умову $p_{l1} < p_{sat}(T_l)$ для кавітаційного скидання рідини. Почергове стиснення та розрідження рідини всередині частинок при періодичній зміні тиску створює ефект «губки». Такий спосіб забезпечує прискорення конвективного масопереносу, що запобігає руйнуванню клітин і його відносять до кавітаційних ефектів [6].

Принцип роботи пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм. В ІТТФ НАН України на основі модифікації існуючого кавітаційного пульсатора [4, 11 – 13] створено принципово новий тип екстрактора пульсаційного типу в якому вперше для посилення кавітаційних ефектів застосовано комбінований гідродинамічний пристрій у склад якого входить сопло Вентурі [14]. Конструктивна схема цього апарата, яка показана на рис. 1 і принцип його роботи практично ті ж самі, як і у традиційного пульсатора з активною мембраною, описаного в роботах [4, 7, 8, 15], але з певною принциповою відмінністю.

Робоча камера 1 виконана у вигляді короткого циліндра верхня і нижня основи якого мають форму кульового сегмента. Через круглий отвір у верхній основі камера за допомогою горизонтальної труби 2, на якій встановлено сопло Вентурі 3, з'єднана із завантажувальною ємністю 4, що містить оброблювану рідинну суміш із заданою температурою T_b , що знаходиться під атмосферним тиском p_a . Отвір у нижній основі з'єднує робочу камеру з газовим трактом. Швидкодіючий електромагнітний клапан 5 дозволяє періодично через задані інтервали часу підключати камеру або до ресивера високого тиску (РВТ) 6, під'єданого до компресора, або до ресивера низького тиску (РНТ) 7, під'єданого до вакуумного насоса. У процесі екстрагування показники тиску в ресиверах підтримуються постійними в інтервалах значень $p_{comp} = 0.2 \div 0.4$ МПа і $p_{vac} = 0.001 \div 0.003$ МПа

відповідно. Тиск в ресиверах p_{comp} і p_{vac} так само з тривалістю підключення кожного ресивера до робочої камери τ_{comp} і τ_{vac} є режимними параметрами установки. У центрі робочої камери розташована, виготовлена з міцної резини, діафрагма, що жорстко з'єднана по довжині кола з бічною поверхнею камери. Під дією тиску центральна частина діафрагми щільно прилягає позмінно до верхньої або нижньої основи, перекриваючи, відповідно, верхній або нижній отвір камери. На стадії підключення камери до РВТ діафрагма переміщується до верхньої основи, інтенсивно виштовхуючи рідину з камери по трубі через сопло Вентурі до завантажувальної ємності. До моменту перекриття верхнього отвору швидкість течії набуває значення порядку 10 м/с, і рідина рухається вгору по трубі без контакту з діафрагмою.

Після відриву рідини від діафрагми утворюється порожнина з безперервно зростаючим об'ємом, що поступово заповнюється парою. Через швидкісний рух стовпа рідини тиск пари всередині порожнини суттєво нижчий тиску насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Тиск в рідині на межі з порожниною миттєво знижується від величини $p_{comp} \approx 0.3 \text{ МПа}$ до $p_l < p_{sat}(T_l) \approx 0.002 \text{ МПа}$, що приводить до закипання рідини поблизу вільної поверхні. Через різницю тисків $p_a - p_{sat}(T_l)$ і дії сил тертя об стінку рідина в трубі швидко гальмує і потім, змінюючи напрям, рухається зі зростаючою швидкістю у напрямку камери доки не досягне вхідного отвору в камеру. Якщо до цього моменту камера під'єднана до РВТ то вхід в камеру перекритий і рідина в трубі одразу зупиняється. Якщо ж камера

через електромагнітний клапан вже з'єднана з РНТ то рідина з труби швидко заповнює камеру і зупиняється на діафрагмі, що прилягає до нижньої основи. В обох випадках миттєва зупинка потоку ініціює явище гідравлічного удару. При наступному під'єднанні камери з РВТ цикл повторюється. Частота повторень циклу в залежності від заданого режиму становить 0.5 – 1.5 Гц.

Новизна конструкції полягає в тому, що в середину з'єднувальної труби між камерою та ємністю розміщено сопло Вентурі заданої геометрії. При проходженні в трубі рідини, швидкість якої періодично змінюється за величиною і напрямом, в соплі Вентурі відбувається періодична зміна тиску і створюються динамічні кавітаційні ефекти, що сукупно сприяє конвективному переносу цільової речовини через капіляри і пори частинок сировини. Як показали попередні дослідження апарата, застосування в пульсаційному екстракторі сопла Вентурі суттєво скорочує час екстракції, створює можливість роздрібнюватися частинки і суттєво збільшити за рахунок цього вихід цільової речовини. Ще однією особливістю конструкції апарата є те, що, як видно з рис.1 камеру, на відміну від традиційної схеми [4], розміщено під завантажувальною ємністю. Це не впливає на режими роботи апарата, але запобігає накопиченню повітря всередині робочої камери в процесі роботи, що посилює ефективність кавітаційної дії. Ще одна особливість полягає в тому, що зазвичай сопло Вентурі, при застосуванні його в системах рециркуляції в якості кавітатора, працює в умовах, коли через сопло безперервно проходить стаціонарний турбулентний



Рис. 1. Схема пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм:

1 – робоча камера; 2 – труба; 3 – сопло Вентурі; 4 – завантажувальна ємність; 5 – електромагнітний клапан; 6 – ресивер високого тиску(РВТ); 7 – ресивер низького тиску (РНТ)

Fig. 1. Scheme of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device:

1 – working camera; 2 – tube; 3 – Venturi nozzle; 4 – loading capacity; 5 – solenoid valve; 6 – high pressure receiver (HPR); 7 – low pressure receiver (LPR)

і односпрямований потік рідини [2, 5, 7]. Це дозволяє визначити раціональну геометрію сопла і оптимальні режими його роботи. В даному випадку в соплі Вентурі періодично змінюється і швидкість, і напрямок течії через сопло, що потребує спеціальної розробки аналітичної методики розрахунку оптимальних режимів роботи апарата.

Результати аналізу ініціювання ефектів у пульсаційному екстракторі. У роботах [7, 11 – 13] представлено математичні моделі, що адекватно описують гідро- і аеродинамічні процеси в рідинному та газовому трактах пульсаційного апарата кавітаційного типу з урахуванням теплофізичних і реологічних характеристик оброблюваної рідинної суміші. У рамках моделі розраховуються поточні значення тиску і швидкості рідини в робочій камері та трубі, значення швидкості і тиску повітря у каналах, що з'єднує камеру з ресиверами, а також термічні ефекти, що виникають під час роботи апарата. На рис. 2а представлено для одного з режимів роботи апарата розрахункові дані зміни тиску в рідині у трубі на виході із камери протягом п'яти циклів роботи. Для порівняння на рис. 2 б для того ж режиму представлено результати експериментальних вимірювань тиску в трубі на виході з камери за допомогою чутливого датчика тиску, покази якого виводяться на екран осцилографа. Довжина труби становить 60 см, а діаметр – 2.5 см. Сопло Вентурі встановлено поперечним розрізом на відстані половини довжини труби.

При швидкості входу в трубу порядку 10 м/с рідина під дією протитиску на виході $p_a = 0.1$ МПа і сили тертя об стінку швидко сповільнюється. Через 50 мс після перекриття верхнього отвору рідина зупиняється на відстані 26 см від входу в робочу камеру, після

чого починає переміщатись у зворотному напрямі. При гальмуванні величина від'ємного прискорення досягає -3300 м/с². При зворотному русі рідини максимальна величина прискорення досягає 850 м/с².

На рис. 2 видно, що при заданому тиску в РВТ $p_{comp} = 0.3$ МПа амплітуда імпульсів тиску в момент гідрравлічного удару перевищує 0.6 МПа. Гідроудар супроводжується високочастотним чергуванням затухаючих імпульсів стиснення і розрідження в рідині. Спостерігається, що при перекритті діафрагмою верхнього отвору камери тиск у рідині різко знижується до нульового рівня.

Проведений за допомогою моделі аналіз дозволяє вибирати раціональну геометрію обладнання і оптимальні режими його роботи залежно від характеристик оброблюваного середовища за критеріями максимальної продуктивності і мінімізації енерговитрат.

Основними динамічними ефектами, що реалізуються в даному пульсаційному апараті та суттєво інтенсифікують процес екстракції є динамічна дія струменю, що витікає з великою швидкістю з робочої камери і сприяє інтенсивному турбулентному перемішуванню суміші; дія гідроудару, що виникає при гальмуванні зворотного потоку, що супроводжується високочастотною зміною стиснення і розрідження рідини в трубі та, як наслідок, виникнення вторинних кавітаційних ефектів. Основні кавітаційні ефекти виникають після виходу рідини з робочої камери в трубу, а також з сопла Вентурі в трубу.

При розриві суцільності потоку рідини в момент перекриття отвору діафрагмою тиск на верхній межі рідини $p_{10} = 0.3$ МПа миттєво знижується до деякого

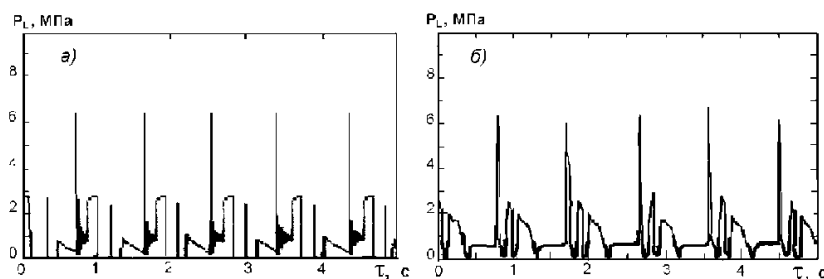


Рис. 2. Зміна тиску з часом у рідині на виході з камери протягом 5 циклів обробки:

а) розрахунок по моделі; б) дані експериментальних досліджень

5 – чохла термопар; 6 – кріплення термопар; 7 – підставка

Fig. 2. Pressure change over time in the liquid at the exit from the chamber during 5 processing cycles:

a) calculation according to the model; b) experimental research data

від'ємного значення. Падіння тиску зумовлено ефектом розтягування вільного стовпа рідини, який до цього був стиснений. Це явище, що виникає у трубі пульсатора в момент миттєвого перекриття отвору за своєю природою подібний до другої і третьої стадій гідроудару. Імпульс від'ємного тиску від вільної поверхні рідини розповсюджується вздовж труби до вихідного перерізу каналу зі швидкістю звуку в рідині c_{ac} . При довжині труби $L = 60$ см з урахуванням сопла Вентурі імпульс проходить цю відстань за 0.4 мс. У відповідності з теорією гідралічного удару час існування імпульсу від'ємного тиску всередині труби визначається відношенням $\Delta\tau_{p_{min}} = 2L/c_{ac}$ і становить приблизно 0.8 мс. За цей проміжок часу рідина в трубі встигає переміститися всього на 8 мм. Відповідно, фаза розтягування в зоні рідини поблизу її вільної поверхні триває приблизно 0.8 мс і потім змінюється фазою стиснення, при якій $p_l \gg p_a$.

Якщо розглядати переріз в трубі не на рівні вільної поверхні стовпа рідини, а на відстані X від неї у напрямі до завантажувальної ємності, то фаза розтягування починається пізніше і закінчується раніше. Тривалість фази розтягування на відстані X від вільної поверхні визначається відношенням $\Delta\tau_{p_{min}} = 2(L - x)/c_{ac}$.

Таким чином, картину формування кавітаційного кластера в рідині всередині труби пульсатора можна представити наступним чином. Після розриву суцільності потоку і миттєвого розтягу рідини вниз по

трубі проходить імпульс від'ємного тиску, що призводить до виникнення кавітаційних ефектів – інтенсивного формування і росту парових бульбашок в екстрагенті протягом часу за який фронт розрідження досягає вихідного перерізу труби. Ріст кавітаційних бульбашок на стадії розтягування продовжується до тих пір, доки величина тиску в рідині не перевищує величину тиску насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Якщо декремент затухання коливань знакозмінного тиску не дуже великий, то процес зростання і схлопування бульбашок за час перекриття камери діафрагмою буде спостерігатись неодноразово.

За допомогою моделі гідродинамічних процесів у розглядуваному пульсаційному апараті можна розрахувати зміну з часом тиску рідини у будь-якій точці труби на будь-якій стадії процесу. Аналіз показує, що на стадії перекриття верхнього отвору камери на будь-якій ділянці труби мінімальне значення тиску $p_l \ll p_{sat}(T_l)$, а максимальне значення $p_l > p_a$. Виконання цих умов завжди забезпечує виникнення з наступним руйнуванням кавітаційного кластера, який в процесі свого розвитку суттєво інтенсифікує масообмінні процеси на макрорівні та прискорює вилучення біологічно активних компонентів з клітин рослинної сировини.

Для наочної кількісної оцінки динамічних параметрів кавітаційного кластера використано представлену в роботі [7] математичну модель динаміки ансамблю парових бульбашок у процесах кавітації та кипіння. На рис. 3 для контрольного режиму екстра-

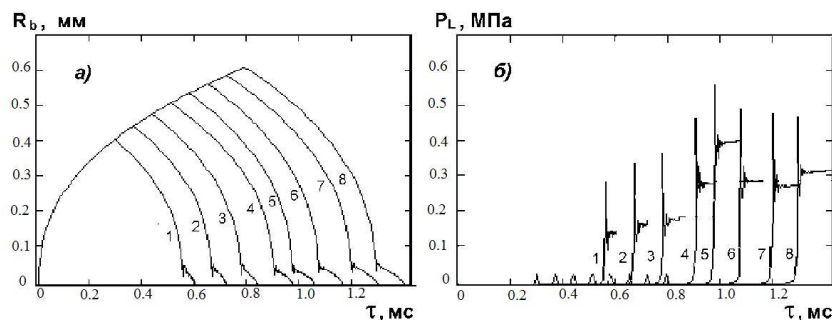


Рис. 3. Зміна з часом бульбашок кавітаційних кластерів у різних зонах труби (а) та імпульсів тиску при кавітаційному захопленні бульбашок кластера у цих зонах (б)

Результати розрахунку представлено для різних відстаней поперечних перерізів від вільної поверхні стовпа рідини: 1 – 5 см; 2 – 10 см; 3 – 15 см; 4 – 20 см; 5 – 25 см; 6 – 30 см; 7 – 35 см; 8 – 40 см. Екстрагент – вода. Тиск у рідині на вході у трубу – 0.3 МПа; температура рідини – 20 °С; швидкість рідини – 10 м/с

Fig. 3. Change over time of bubbles of cavitation clusters in different zones of the pipe (a) and pressure pulses cavitation collapse of cluster bubbles in these zones (b).

The calculation results are presented for different distances of the cross sections from the free surface of the liquid column:

1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; 4 – 20 cm; 5 – 25 cm; 6 – 30 cm; 7 – 35 cm; 8 – 40 cm. The extractant is water. The pressure in the liquid at the entrance to the pipe is 0.3 MPa; liquid temperature is 20 °C; the speed of the liquid is 10 m/s

гування з використанням води у якості екстрагента наведено результати розрахунку динаміки кавітаційного кластера на різних ділянках труби.

На рис. 3а показано як змінюється радіус бульбашок кластера за час його існування на різних відстанях від рівня вільної поверхні. На рис. 3б представлені дані по зміні тиску в міжбульбашковому просторі у відповідних точках труби. Спостерігається, що на стадії захоплювання кластера пікові значення локального тиску в момент захоплювання бульбашок кластера достатньо високі.

Висновки.

Отримані результати аналітичних досліджень в пульсаційному екстракторі дозволяють проаналізувати умови ініціювання кавітаційних ефектів у рідинному тракті апарата. Значення зміни тиску з часом у рідині протягом 5 циклів обробки однакові як для аналітичних розрахунків, так і експериментальних. Отже, при заданому тиску в РВТ $p_{comp} = 0.3$ МПа амплітуда імпульсів тиску в момент гідравлічного удару перевищує 0.6 МПа і, відповідно, гідроудар супроводжується високочастотним чергуванням затухаючих імпульсів стиснення і розрідження в рідині, що в свою чергу інтенсифікує процес екстракції. Отримані розрахункові значення вказують на виконання критеріїв ефективності кавітаційного впливу. Пікові значення локального тиску в момент захоплювання кавітаційного кластера знаходяться у діапазоні 0.3 – 0.6 МПа.

Теоретичний аналіз результатів експериментальних досліджень процесу екстракції з рослинної сировини, проведений на пульсаційних екстракторах з комбінованими гідродинамічними пристроями, дозволяє рекомендувати оптимальні динамічні та термічні режими кавітаційної обробки для конкретного виду сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ashokkumar M., Krasulya O., Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // Appl. Phys. Research.–2012. –Vol.4, No.1.–pp.19–29. <https://doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>
2. Parag R. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011. –Vol.4, No.6, pp 996–1011. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11947-010-0418-1>
3. Rooze, J. Cavitation in gas-saturated liquids. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven –2012.– 120 pp. <https://doi.org/10.6100/IR732583>
4. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums // Acta Periodica Technologica 2024 Issue 55, Pages: 215-223 <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>
5. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: Видавн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 2009. 220 с.
6. Екстракція рослинної сировини / Ю.І. Сидоров, І.І. Губицька, Р. Т. Конечна, В. П. Новіков. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – С. 116–117.
7. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. – Киев: Наук. думка, 2008. – 381 с.
8. Чайка О. І., Гоженко Л. П., Іваницький Г. К., Корінчук Д.М. Інтенсифікація диспергування низинного торфу із застосуванням пульсаційного диспергатора. Пром. Теплотехніка. 2013. № 35 (5). 20 –26.
9. Іваницький Г. К., Чайка О. І., Гоженко Л.П. Застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстрагування з рослинної сировини. Наукові праці ОНАХТ. 2015. № 47 (2). 138 – 142. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.419>
10. Басок Б.І., Новицька М.П., Чайка О. І. Гідродинаміка и теплообмін при пневмопульсационном воздействии на жидкие системы. – Київ: Калита, 2014. – 140 с.
11. Іваницький Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. // Пром. теплотехника. –2003. –Т.25, №1. –С.29–34.
12. Іваницький Г.К. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа / Г. К. Иваницкий, Л.П. Гоженко // Пром. теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 6. – с. 49 – 56
13. Іваницький Г.К. Численное исследование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. // Наукові праці ОНАХТ.–2017.– Т.81, вип.1, С.114–120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.686>
14. Макаренко, А.А. Дослідження ефективності застосування різних конструкцій проточних кавітаційних змішувачів / А.А. Макаренко // Теплофізика та теплоенергетика. – 2019. – Т.41. - №1. – С. 74-79. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2019.10>
15. Накорчевский А.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок. – Киев: Наукова думка, 2001. – 345 с

ANALYTICAL STUDIES OF THE INITIATION OF CAVITATION EFFECTS IN THE PULSATION EXTRACTOR WITH THE COMBINED HYDRODYNAMIC DEVICE

Obodovych O.M.¹, Ivanitsky G.K.², Gozhenko L.P.³, Tselen B.Y.⁴, Nedbailo A.Y.⁵

¹⁻⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiska Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine*

¹*Doc. Tech. Sci., Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

²*Doc. Tech. Sci., Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>*

³*PhD (Engin.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>*

⁴*PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

⁵*PhD (Engin.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.4>

It was established that today there is no clear theoretical basis for understanding the possibilities and limitations of the application of cavitation devices in solving specific problems. Analytical studies were carried out with the aim of determining additional methods of intensification of cavitation effects in a pulsation extractor operating in the mode of a cavitation reactor. The conditions for the occurrence of cavitation effects in a pulsating extractor with a combined hydrodynamic device have been clarified. The principle of operation of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device is considered, in which a powerful complex of cavitation mechanisms is initiated, which allows processing a variety of raw materials with a wide range of properties with relatively low energy consumption. The model of hydrodynamic processes in a cavitation-type pulsating extractor was taken as a basis, which made it possible to obtain calculated changes over time in the pressure of the liquid at the control points of the pipe at different stages of the process. The analysis of the initiation of cavitation effects is made on the basis of the described one-dimensional flow of liquid compressible in a

pipe behind an instantaneously closed diaphragm, as well as in the constriction of a Venturi nozzle. It is shown that the formation and growth of cavitation bubbles occurs at the stage of rarefaction, and their collapse occurs at the stage of compression. It has been established that fulfillment of the criteria for the efficiency of the cavitation effect ensures the emergence and subsequent destruction of a cavitation cluster, which in the course of its development significantly intensifies the mass exchange processes at the macro level and accelerates the extraction of active components from the cells of plant raw materials.

References 15, figures 3.

Key words: pulsation extractor, hydrodynamic cavitation, Venturi nozzle, modeling, energy efficiency.

1. Ashokkumar M., Krasulya O., Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // Appl. Phys. Research.–2012. –Vol.4, No.1.–pp.19–29. <https://doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>

2. Parag R. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011. –Vol.4, No.6, pp 996–1011. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11947-010-0418-1>

3. Rooze, J. Cavitation in gas-saturated liquids. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven –2012.– 120 pp. <https://doi.org/10.6100/IR732583>

4. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums // Acta Periodica Technologica 2024 Issue 55, Pages: 215-223 <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>

5. Vitenko T. (2009). Hidrodinamichna kavitatsia u masoobminnykh, chimichnykh i biolohichnykh protsessakh: Monografiia. [The hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes: Monograph]. Ternopil. Ternopil Ivan Puliuy National Technical University. 220 p. [in Ukrainian].

6. Sydorov, Yu., Hubyts'ka, I., Konechna, R., Novikov, V. (2008), Extraction of plant material [Ekstraktsiya roslynnoyi syrovyny], Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika», Lviv, pp. 116-117. [in Ukrainian].

7. Dolinskyi, A. A., Ivanitskyi, G. K. (2008), Teplomassoobmen i hidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sistemakh. Teplofizicheskie osnovy diskretno-impulsnoho vvoda enerhii [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapour-liquid disperse systems. Thermophysical basics of the method of discrete-pulse energy input.], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine, 381 p. . [in Rus.].

8. Chaika O. I., Gozhenko L. P., Ivanitskyi G. K., Korinchuk D. M. (2013). Intensyfikatsia dysperhuvannia nyzynnoho torfu iz zastosuvanniam pulsatsiynoho dysperhatora [Intensification of lowland peat dispersion using a pulsating disperser]. *Prom. Teplotechnika* [Industrial heat engineering]. 5 (35). 20 – 26. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Ukrainian].
9. Ivanitskyi G. K., Chayka O. I., Gozhenko L. P. (2015). Zastosuvannia kavitatsiynoho reaktora pulsatsiynoho typu dlia ekstraktsii z roslinnoi syrovyny [The use of pulsating cavitation reactor type for extraction of plant raw material]. *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Works]. 2 (47). 138 – 142. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.419> [in Ukrainian].
10. Basok, B. I., Novitskaia, M. P., Chayka, O. I. (2014). Hidrodynamika i teploobmen pri pnevmopulsatsiynom vozdeystvii na zhydkie sistemi [Hydrodynamics and heat transfer in case of pneumatic pulsation action on liquid systems], *Kalyta, Kyiv*, 140 p. [in Rus.].
11. Ivanitskyi, G.K., Korchynskyi, A.A., Matiushkin, M.V. (2003) Matematicheskoe modelirovanie protsessov v pulsatsiynom disperhatore udarnoho tipa [The mathematical modeling of processes in pulsating dispersant of impact type]. *Prom. teplotechnika* [Industrial heat engineering], Kyiv: 25 (1), 29 - 34. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Rus.].
12. Ivanitskiy, G.K., Gozhenko, L.P. (2014). Analiticheskoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya kavitatsii v trubie pulsatsiynogo dispergatora udarnogo tipa. *Prom. teplotechnika*, 36(6), 49–56. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Rus.].
13. Ivanitskyi G. K (2017) Chislennoe issledovanie povedeniya puzyrkovoho klastera v protsesakh hidrodynamichnoi kavitatsii [Numerical study of bubble cluster behavior in hydrodynamic cavitation processes]. *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Works]. 1 (81). 114–120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v8i1i1.686> [in Rus.].
14. Makarenko, A. (2018). RESEARCH OF THE APPLICATION EFFICIENCY OF DIFFERENT CONSTRUCTIONS OF FLOW CAVITATION MIXERS. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 74-81. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2019.10> [in Ukrainian].
15. Nakorchevskiy, A. I., Basok, B. I. (2001), Hidrodynamika i massoperenos v heterohennykh sistemakh i pulsiruiushchikh potokakh [Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows], *Naukova dumka, Kyiv, Ukraine*, 345 p. [in Rus.].

Отримано 03.02.2025
Received 03.02.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025

УДК 532.536

ТЕПЛООБМІН ПРИ ПРИРОДНІЙ КОНВЕКЦІЇ В ПОРИСТОМУ МІКРОКАНАЛІ
З НЕСИМЕТРИЧНИМ ОБІГРІВОМАвраменко А.О.¹, член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М.², канд. техн. наук,
Кобзар А.С.³, аспірант, Архипов О.П.⁴, канд. техн. наук

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

¹професор, завідувач відділу, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>²провідний наук. співр., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8455-4689>, e-mail: kovetskamargarita@ukr.net³аспірант, <https://orcid.org/0009-0000-5598-6864>, andrykobzar@gmail.com⁴старший наук. співр., 0689274410a@gmail.com<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.5>

Робота присвячена вивченню природної конвекції у плоскому пористому мікроканалі з несиметричним обігрівом. На підставі аналізу симетрії отримано аналітичні рішення для профілів швидкості та температури з урахуванням граничних умов прослизання та стрибка температури на стінках каналу. Показано вплив чисел Грасгофа, Кнудсена, Дарсі та Прандтля на характеристики течії в мікроканалі та коефіцієнти тепловіддачі.

This work is dedicated to the study of natural convection in a flat porous microchannel with asymmetric heating. Analytical solutions for velocity and temperature profiles have been derived based on symmetry analysis, taking into account boundary conditions such as slip and temperature jump at the channel walls. The effect of Grashof, Knudsen, Darcy, and Prandtl numbers on the flow characteristics in the microchannel and heat transfer coefficients is demonstrated.

Бібл. 19, табл. 4.

Ключові слова: Теплообмін, природня конвекція, мікроканал, пористе середовище. K – проникність пористого середовища; L – довжина ковзання; T – температура; Pr – число Прандтля; Gr – число Грасгофа; Da – число Дарсі; Kn – число Кнудсена; Nu – число Нуссельта; h – ширина каналу; v, u – поздовжня та нормальна складові швидкості; x, y – декартові координати; g – гравітаційне прискорення; q – інфінітезимальний генератор; α – коефіцієнт тепловіддачі; ν – динамічна в'язкість; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Теплообмінні процеси в мікроканалах активно досліджуються через їх широке застосування в хімічній промисловості, енергетиці, електротехніці. У роботі [1] представлений огляд досліджень у галузі фізики плинину рідини та газу в мікроканалах та пористих середовищах. Розглянуто чотири напрями використання мікроканальних пристроїв у галузі енергетики: пристрої електрокінетичного перетворення енергії, мембранне опріснення води за допомогою зворотного осмосу, сланцеві резервуари та зберігання водню. Показано, що подальше поліпшення параметрів процесів може бути досягнуто шляхом моделювання довжини ковзання як функції ключових параметрів; зв'язування залежності

змочуваності та ковзання; включення дифузії та ковзання в визначальні рівняння зберігання газоподібного водню. Огляд виявив критичні прогалини у поліпшенні моделювання потоку рідини у кожному із чотирьох додатків.

При мікронних та субмікронних розмірах системи, що моделюється, математична модель течії не може бути сформульована в рамках макроскопічного підходу. При вирішенні таких завдань для опису течії зазвичай використовують або рівняння Нав'є - Стокса з граничними умовами прослизання [2], або рівняння Больцмана в тому чи іншому наближенні [3,4]. У роботах [3,4] розглянуто підхід до аналізу мікропотоків з використанням

методу ґрат Больцмана та проаналізовано вплив числа Кнудсена на гідродинамічні характеристики потоку. Результати розрахунку цього підходу порівнювалися з результатами аналітичного рішення [4].

Результати дослідження тепловіддачі при природній конвекції в пористих каналах використовують у сонячних колекторах, будівельних конструкціях зі складною геометрією, мікроелектронних пристроях, системах мастила [5-7].

Теплообмін при течії в'язкої електропровідної рідини через щільний мікроканал з пористим матеріалом досліджено у роботі [8]. Одна поверхня каналу супергідрофобна. Показано, що температура рідини збільшується із збільшенням в'язкої дисипації та пористості найбільш інтенсивно на супергідрофобній поверхні.

Багато робіт присвячено дослідженню природної конвекції в мікроканалах за наявності електромагнітного поля [9-13]. У роботах [9,10] показано вплив пористості, поперечного магнітного поля на теплообмін при природній конвекції в пористому мікроканалі. Природна конвекція електропровідної рідини у вертикальному мікроканалі прямокутної геометрії розглянута у роботі [11]. Показано вплив магнітного поля, супергідрофобності та пористості стінок каналу на основні характеристики течії та теплообміну. Природна конвекція електропровідної рідини під впливом магнітного поля та теплового випромінювання досліджується в роботах [12,13]. Показано, що із збільшенням теплового випромінювання швидкість тепловіддачі зменшується.

Нестійкість ковзної течії в каналі, зайнятому гіперпористим середовищем, описана в роботах [14,15]. У роботах [16-18] представлені результати дослідження змішаної конвекції у вертикальних плоских та круглих мікроканалах з урахуванням граничних умов ковзання. Показано вплив пористості та прослизання на коефіцієнти тепловіддачі. Розмір стрибка температури на стінці залежить від значення числа Прандтля і зменшується зі збільшенням числа Прандтля. Форма поперечного перерізу каналу істотно впливає на середні числа Нуссельта.

Мета роботи полягає у теоретичному дослідженні впливу пористості на теплообмін при вільній конвекції в плоскому мікроканалі з несиметричним обігрівом на основі аналізу симетрій.

Математична модель

Розглядається стаціонарна вільна конвекція в'язкої рідини в пористому мікроканалі шириною h між двома вертикальними плоскими пластинами. При цьому враховуються стрибки швидкості та температури на поверхні, які обумовлені прослизанням при низьких ти-

сках та щільності робочого середовища. Вісь y спрямована вздовж пластини, вісь x перпендикулярно пластині. Потік вважається двовимірним. Пластини нагріваються асиметрично. Температура лівої пластини T_1 більша, ніж температура правої пластини T_2 . Вільна конвекція у мікроканалі виникає внаслідок великої різниці температур між пластинами. При цьому використовується наближення Буссінеска, коли змінність густини враховується тільки при розрахунку сили Архімеда. Температура пористого тіла вважається рівною температурі рідини, температура рідини менша, ніж T_1 , але більша, ніж T_2 .

Течія та теплообмін у пористому мікроканалі описується системою рівнянь Нав'є-Стокса та енергії з урахуванням пористості середовища [19].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\nu}{K} u. \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\nu}{K} v + g\beta \Delta T \theta. \quad (3)$$

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

де

$$\theta = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{T - T_2}{\Delta T}, \quad \beta = \frac{2}{T_1 + T_2}. \quad (5)$$

Ефекти ковзання швидкості та стрибка температури на стінках каналу враховуються у граничних умовах для системи рівнянь (1) – (4)

$$v_w = L \left(\frac{dv}{dx} \right)_w, \quad u = 0, \quad T - T_1 = \frac{L}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \quad (6)$$

для $x = 0$,

$$v_w = -L \left(\frac{dv}{dx} \right)_w, \quad u = 0, \quad T - T_2 = -\frac{L}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \quad (7)$$

для $x = h$,

Система рівнянь (1) – (4) має дискретну симетрію. Формально цю симетрію можна описати інфінітезимальним

генератором при дискретних значеннях параметра групового перетворення

$$\mathbf{q} = C_1 x \frac{\partial}{\partial x} + C_2 y \frac{\partial}{\partial y} + C_1 u \frac{\partial}{\partial u} + C_2 v \frac{\partial}{\partial v} + C_2 \theta \frac{\partial}{\partial \theta}. \quad (8)$$

Спочатку знайдемо автомодельну змінну η використовуючи симетрію C_2

$$y \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

Це дає

$$\eta = \frac{x}{h}. \quad (10)$$

Параметр $1/h$ в рівнянні (10) використовувалося виключно з метою параметризації автомодельної змінної. Автомодельна функція f для швидкості буде знайдена з симетрії C_2 за наступним співвідношенням

$$y \frac{\partial f'}{\partial y} + v \frac{\partial f'}{\partial v} = 0. \quad (11)$$

Тут похідна $f'(\eta)$ використовується для інтегрування рівняння нерозривності (1). Інтегрування рівняння (11) дає

$$v = \frac{vy}{h^2} f'(\eta) = \frac{v}{h} \xi f'(\eta), \quad (12)$$

де

$$\xi = \frac{y}{h}. \quad (13)$$

Тут v/h^2 є просто коефіцієнт параметризації. Рівняння нерозривності (1) дає з урахуванням (12) наступне рівняння

$$u = -\frac{v}{h} f(\eta). \quad (14)$$

Також симетрія C_2 дозволяє отримати рівняння для температури

$$\theta = \frac{\xi}{Gr} \Theta(\eta), \quad (15)$$

де

$$Gr = \frac{g \beta h^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (16)$$

– число Грасгофа.

Заміна рівнянь (12), (14) і (15) у рівняннях (2), (3) і (4) зрештою призводить до системи звичайних диференціальних рівнянь

$$f^{IV} + (ff''' - ff''^2) + \Theta' - \frac{f''}{Da} = 0 \quad (17)$$

$$\Theta'' - Pr(f' \Theta - f \Theta') = 0, \quad (18)$$

де

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad Da = \frac{K}{h^2}. \quad (19)$$

Граничні умови (6) та (7) можна переписати у вигляді

$$f = 0, f'(0) = Kn f''(0), \quad \Theta - \frac{Gr}{\xi} = \frac{Kn}{Pr} \Theta'(0) \quad \eta=0, \quad (20)$$

$$f = 0, f'(1) = -Kn f''(1), \quad \Theta = -\frac{Kn}{Pr} \Theta'(1) \quad \eta=1, \quad (21)$$

де

$$Kn = \frac{L}{h} \text{ - число Кнудсена.}$$

Коефіцієнт тепловіддачі визначається з урахуванням рівняння (15)

$$\alpha = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_w = -\frac{\lambda}{h} \left(\frac{d\Theta}{d\eta} \right)_w \frac{\xi}{Gr}. \quad (22)$$

Тепер число Нуссельта запишеться

$$Nu = \frac{\alpha h}{\lambda} = -\left(\frac{d\Theta}{d\eta} \right)_w \frac{\xi}{Gr}. \quad (23)$$

Вплив різних параметрів на природну конвекцію в пористому мікроканалі представлено в таблицях 1-4. При малих значеннях числа Грасгофа $Gr < 100$ швидкість потоку дуже мала, а профілі швидкості та температури

ри лінійні. Зі збільшенням Gr формується висхідний потік поблизу гарячої поверхні і низхідний потік поблизу холодної стінки. Швидкість висхідного потоку та низхідного потоку, а також прослизання на стінках каналу збільшуються зі збільшенням Gr.

Зі збільшенням числа Gr профіль температури деформується – стає нелінійним. В результаті коефіцієнт тепловіддачі біля гарячої стінки зростає зі зростанням значення числа Грасгофа, а на холодній – зменшується (табл.1). Це обумовлено несиметричністю зміни профілю швидкості висхідного та низхідного потоків. Крім того, стрибок температури на гарячій стінці більший, ніж на холодній через зростання довжини вільного пробігу молекул зі зростанням температури. Коефіцієнт тертя на холодній стінці зростає менш інтенсивно, ніж на гарячій зі збільшенням Gr.

Вплив числа Kn (ефект прослизання) на параметри потоку в мікроканалі показано в таблиці 2.

Зі збільшенням числа Kn збільшується швидкість поблизу стінок каналу, прослизання та стрибок температури на стінках. На гарячій стінці прослизання та стрибок температури більше, ніж на холодній через вплив температури на довжину вільного пробігу молекул. Зі

збільшенням числа Kn теплова взаємодія теплоносія зі стінками зменшується, стрибки температур на стінках збільшуються, коефіцієнти тепловіддачі зменшуються. Зі збільшенням числа Kn тертя на стінках зменшується.

В табл. 3 показано вплив пористості на коефіцієнт тепловіддачі і тертя на стінці у мікроканалі. Зі збільшенням числа Da швидкості збільшуються як у висхідному, так і в низхідному потоках, оскільки величина обернена до Дарсі характеризує гідравлічний опір. З тієї ж причини збільшуються стрибки швидкості на стінах. Стрибок температури на гарячій стінці збільшується зі збільшенням числа Da, на холодній стінці майже не змінюється. Коефіцієнт тепловіддачі поблизу гарячої стінки збільшується із зростанням числа Da, на холодній стінці зворотна тенденція. Це пов'язано зі зменшенням градієнта температури біля цієї стінки через збільшення нелінійності профілю температури.

Вплив числа Pr на параметри потоку в мікроканалі показано в табл. 4

Для малих чисел Прандтля значно менших одиниці ($Pr = 0,01$) і мінімальних значень числа Gr ($Gr=100$) швидкість потоку невелика, а профіль температури рідини майже рівномірний з великим значенням стриб-

Табл. 1. Вплив числа Gr на число Нуссельта і тертя на стінках f''

Table 1. Effect of the Gr number on the Nusselt number and friction on the walls f''

Gr		10	100	1000	5000	10000
Nu	$\eta=0$	0.881	0.896	1.04	1.533	1.945
	$\eta=1$	0.879	0.874	0.827	0.685	0.588
f''	$\eta=0$	0.0665	0.665	6.662	32.745	62.724
	$\eta=1$	0.0664	0.661	6.269	25.587	41.911

Табл.2. Вплив числа Kn на коефіцієнт тепловіддачі і тертя на стінці f''

Table 2. Effect of the Knudsen number on the heat transfer coefficient and friction on the walls f''

Kn		0	0.05	0.1
Nu	$\eta=0$	2.107	1.945	1.704
	$\eta=1$	0.696	0.588	0.533
f''	$\eta=0$	88.363	62.724	45.944
	$\eta=1$	56.746	41.911	32.466

Табл. 3 Вплив числа Da на коефіцієнти тепловіддачі і тертя на стінках f''

Table 3. Effect of the Darcy number on the heat transfer coefficients and friction on the walls f''

Da		100	0.1	0.02
Nu	$\eta=0$	1.947	1.794	1.461
	$\eta=1$	0.588	0.621	0.704
f''	$\eta=0$	62.833	52.841	33.547
	$\eta=1$	41.955	37.596	27.047

Табл. 4. Вплив числа Pr на коефіцієнт тепловіддачі і тертя на стінках f'' Table 4. Effect of the Prandtl number on the heat transfer coefficient and friction on the walls f''

Pr		0.01	0.73	10	100
Nu	$\eta=0$	0.0909	0.896	1.270	2.998
	$\eta=1$	0.0909	0.874	0.901	0.496
f''	$\eta=0$	0.0687	0.665	0.753	0.750
	$\eta=1$	0.0687	0.661	0.705	0.493

ка температури на стінках через дуже маленьку в'язкість рідини. Зі збільшенням числа Pr стрибок температур на стінках зменшується, профіль температури стає близьким до лінійного. Теплова взаємодія теплоносія зі стінками збільшується, коефіцієнт тепловіддачі також збільшується (табл.4). При великих значеннях числа $Pr = 100$ максимальна швидкість у висхідному та низхідному потоках зменшується, прослизання на холодній стінці також зменшується. Профіль температури значно деформується, а стрибок температури на стінах не спостерігається. Коефіцієнт тепловіддачі поблизу гарячої стінки різко збільшується, а поблизу холодної зменшується (табл.4). Це знову ж таки пов'язано зі зменшенням градієнта температури біля холодної стінки через збільшення нелінійності профілю температури. Така деформація профілю температури зумовлена зростанням гідравлічного опору через збільшення в'язкості середовища. Коефіцієнт тертя на гарячій стінці збільшується, на холодній стінці змінюється слабо і зменшується при $Pr = 100$.

Висновки

Робота присвячена вивченню природної конвекції у плоскому пористому мікроканалі з несиметричним обігрівом стінок. На підставі аналізу симетрії отримано аналітичні рішення для профілів швидкості та температури з урахуванням граничних умов прослизання та стрибка температури на стінках каналу. Показано вплив чисел Грасгофа, Кнудсена, Дарсі та Прандтля на характеристики течії в мікроканалі та коефіцієнти тепловіддачі.

При великих числах Gr формується висхідна течія поблизу гарячої стінки і низхідна поблизу холодної стінки. Зі збільшенням числа Gr коефіцієнт тепловіддачі біля гарячої стінки зростає, а на холодній – зменшується. Це зумовлено несиметричністю зміни профілю швидкості висхідного та низхідного потоків.

Показано вплив числа Kn (ефект ковзання) на параметри потоку. Зі збільшенням числа Kn теплова взаємодія теплоносія зі стінками зменшується, стриб-

ки температур на стінках збільшуються, коефіцієнти тепловіддачі зменшуються.

Зі збільшенням числа Da швидкості збільшуються та зростають стрибки швидкості на стінках внаслідок зменшення гідравлічного опору. Коефіцієнт тепловіддачі поблизу гарячої стінки збільшується із зростанням числа Da, на холодній стінці зворотна тенденція.

Вплив числа Pr не є однозначним. Зі збільшенням числа Pr стрибок температур на стінках зменшується, профіль температури стає близьким до лінійного. Теплова взаємодія теплоносія зі стінками збільшується, коефіцієнт тепловіддачі також збільшується. При великих значеннях числа $Pr = 100$ профіль температури значно деформується, а стрибок температури на стінах не спостерігається. Коефіцієнт тепловіддачі поблизу гарячої стінки різко збільшується, а поблизу холодної зменшується. Це пов'язано зі зменшенням градієнта температури біля холодної стінки. Така деформація профілю температури зумовлена зростанням гідравлічного опору через збільшення в'язкості середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Applications in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, Article ID 9565240, 31p. <https://doi.org/10.1155/2018/9565240>
2. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Instability of a slip flow in a curved channel formed by two concentric cylindrical surfaces. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 2009, 28(6): 722-727. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2009.06.003>
3. 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, 85 (1): 65-72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>

4. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015, 29 (5-6): 351-371. DOI:10.1007/s00162-015-0361-x
5. Nourdanesh N., Hossainpour S., Adamiak K. Numerical simulation and optimization of natural convection heat transfer enhancement in solar collectors using electrohydrodynamic conduction pump. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 180: 115825. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115825>
6. Dutta S., Biswas A.K., Pati S. Numerical analysis of natural convection heat transfer and entropy generation in a porous quadrant al cavity. *International Journal Numerical Methods Heat Fluid Flow*. 2019, 29: 4826–4849. <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2018-0678>
7. Saha L.K., Bala S.K., Roy N.C. Natural convection flow in a fluid-saturated non-Darcy porous medium within a complex wavy wall reactor. *Journal Thermal Analysis Calorimetry*. 2020, 146: 325–340. DOI:10.1007/s10973-020-09945-9
8. Ojmeri G., Onwubuya I.O. Exploring the Dynamics of Viscous Dissipative Fluid past a Superhydrophobic Microchannel in the Coexistence of Mixed Convection and Porous Medium. *Saudi Journal Engineering Technology*. 2023, 8(4): 71-81. DOI: 10.36348/sjet.2023.v08i04.001
9. Bhatti M.M., Bég O.A., Ellahi R., Abbas T. Natural Convection Non-Newtonian EMHD Dissipative Flow Through a Microchannel Containing a Non-Darcy Porous Medium: Homotopy Perturbation Method Study. *Qualitative Theory of Dynamical Systems*. 2022, 21: 97. <https://doi.org/10.1007/s12346-022-00625-7>
10. Hamza M.M., Abubakar A.B., Panyanak B., Pakkaranang N. Free convection flow in a microchannel filled with porous material having temperature-dependent thermal conductivity. *Mathematical Method in the Applied Sciences*. 2022. <https://doi.org/10.1002/mma.8148>
11. Jha B.K., Gwandu B.J. MHD free convection flow in a vertical porous super-hydrophobic micro-channel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020, 235(2): 470-478. <https://doi.org/10.1177/0954408920965059>
12. Ojmeri O., Omokhuale E., Hamza M., Onwubuya I., Shuaibu A. A. Computational Analysis on Steady MHD Casson Fluid Flow Across A Vertical Porous Channel Affected By Thermal Radiation Effect. *International Journal of Science for Global Sustainability*. 2023, 9(3). DOI: <https://doi.org/10.57233/ijsgs.v9i1.393>
13. Hamza M.M., Abdulsalam S., Ahmad S.K. Unsteady MHD free convection flow of an exothermic fluid in a convectively heated vertical channel filled with porous medium. *Sci. reports* 2022, 12: 11989. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16064-y>
14. 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. Vol. 10, № 5. P.435-442. DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20
15. Ramos E., Storey B.D., Sierra F., Zúniga R.A., Avramenko A.A. Temperature distribution in an oscillatory flow with a sinusoidal wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, №22. P. 4929-4938. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.033>
16. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I. Mixed convection in a vertical circular microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017, 121: P.1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.001>
17. Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. Mixed Convection in Vertical Flat and Circular Porous Microchannels. *Transport in Porous Media*. 2018, 124(3): 919 – 941. DOI: 10.1007/s11242-018-1104-4
18. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 106: 1164 – 1173. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.096>
19. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-5541-7>

HEAT TRANSFER AT NATURAL CONVECTION IN A FLAT POROUS MICRO-CHANNEL WITH UNSYMMETRICAL HEATING

Avramenko A.A.¹, Kovetskaya M.M.², Kobzar A.S.³,
Arkhyrov O.P.⁴

*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy
of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680,
Ukraine*

¹Corresponding Member of the NAS of Ukraine, ID
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>

²PhD (Engin.) <https://orcid.org/0000-0002-8455-4689>,
e-mail kovetskamargarita@ukr.net

³graduate student, <https://orcid.org/0009-0000-5598-6864>,
andrykobzar@gmail.com

⁴PhD (Engin.), 0689274410a@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.5>

This work is dedicated to studying natural convection in a flat porous microchannel with asymmetric heating. Analytical solutions for velocity and temperature profiles have been obtained based on symmetry analysis, considering boundary conditions such as slip and temperature jump at the channel walls. The study demonstrates the effect of Grashof, Knudsen, Darcy, and Prandtl numbers on the flow characteristics in the microchannel and on the heat transfer coefficients.

At high Grashof numbers, an ascending flow near the hot wall and a descending flow near the cold wall are formed. With an increase in Gr number, the heat transfer coefficient near the hot wall increases, while it decreases near the cold wall. This is attributed to the asymmetry in the change of velocity profiles of ascending and descending flows.

The study also shows the effect of the Knudsen number on flow parameters. As Kn number increases the thermal interaction of the heat carrier with the walls decreases, the temperature jumps at the walls increase, and the heat transfer coefficients decrease.

With an increase in the Darcy number velocities increase, and velocity jumps at the walls rise due to decreased hydraulic resistance. The heat transfer coefficient near the hot wall increases with Da, while the opposite trend is observed at the cold wall – the heat transfer coefficient decreases with increasing Da number. This is linked to the

decrease in temperature gradient near the cold wall due to the increase in the nonlinearity of the temperature profile.

As the Pr number increases the temperature jump at the walls decreases, and the temperature profile becomes close to linear. The thermal interaction of the heat carrier with the walls increases, and the heat transfer coefficient also increases. At higher Pr values (Pr = 100) the heat transfer coefficient near the hot wall sharply increases, while near the cold wall it decreases. This is linked to the decrease in temperature gradient near the cold wall. Such deformation of the temperature profile is caused by the growth of hydraulic resistance due to the increase in the medium's viscosity.

Ref. 19, tables 4.

Keywords: Heat transfer, natural convection, microchannel, porous medium.

1. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Applications in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, Article ID 9565240, 31p. <https://doi.org/10.1155/2018/9565240>

2. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Instability of a slip flow in a curved channel formed by two concentric cylindrical surfaces. *European Journal of Mechanics - B/ Fluids*. 2009, 28(6): 722-727. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2009.06.003>

3. 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, 85 (1): 65-72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>

4. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015, 29 (5-6): 351-371. DOI:10.1007/s00162-015-0361-x

5. Nourdanesh N., Hossainpour S., Adamiak K. Numerical simulation and optimization of natural convection heat transfer enhancement in solar collectors using electrohydrodynamic conduction pump. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 180: 115825. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115825>

6. Dutta S., Biswas A.K., Pati S. Numerical analysis of natural convection heat transfer and entropy generation in a porous quadrant al cavity. *International Journal Numerical. Methods Heat Fluid Flow*. 2019, 29: 4826–4849. <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2018-0678>

7. Saha L.K., Bala S.K., Roy N.C. Natural convection flow in a fluid-saturated non-Darcy porous medium within a complex wavy wall reactor. *Journal Thermal Analysis Calorimetry*. 2020, 146: 325–340. DOI:10.1007/s10973-020-09945-9

8. *Ojmeri G., Onwubuya I.O.* Exploring the Dynamics of Viscous Dissipative Fluid past a Superhydrophobic Microchannel in the Coexistence of Mixed Convection and Porous Medium. *Saudi Journal Engineering Technology*. 2023, 8(4): 71-81. DOI: 10.36348/sjet.2023.v08i04.001
9. *Bhatti M.M., Bég O.A., Ellahi R., Abbas T.* Natural Convection Non-Newtonian EMHD Dissipative Flow Through a Microchannel Containing a Non-Darcy Porous Medium: Homotopy Perturbation Method Study. *Qualitative Theory of Dynamical Systems*. 2022, 21: 97. <https://doi.org/10.1007/s12346-022-00625-7>
10. *Hamza M.M., Abubakar A.B., Panyanak B., Pakkaranang N.* Free convection flow in a microchannel filled with porous material having temperature-dependent thermal conductivity. *Mathematical Method in the Applied Sciences*. 2022. <https://doi.org/10.1002/mma.8148>
11. *Jha B.K., Gwandu B.J.* MHD free convection flow in a vertical porous super-hydrophobic micro-channel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020, 235(2): 470-478. <https://doi.org/10.1177/0954408920965059>
12. *Ojmeri O., Omokhuale E., Hamza M., Onwubuya I., Shuaibu A. A.* Computational Analysis on Steady MHD Casson Fluid Flow Across A Vertical Porous Channel Affected By Thermal Radiation Effect. *International Journal of Science for Global Sustainability*. 2023, 9(3). DOI: <https://doi.org/10.57233/ijsgs.v9i1.393>
13. *Hamza M.M., Abdulsalam S., Ahmad S.K.* Unsteady MHD free convection flow of an exothermic fluid in a convectively heated vertical channel filled with porous medium. *Sci. reports* 2022, 12: 11989. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16064-y>
14. *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. Vol. 10, №1 5. P.435-442. DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20
15. *Ramos E., Storey B.D., Sierra F., Zúñiga R.A., Avramenko A.A.* Temperature distribution in an oscillatory flow with a sinusoidal wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, №22. P. 4929-4938. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.033>
16. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I.* Mixed convection in a vertical circular microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017, 121: P.1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.001>
17. *Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I.* Mixed Convection in Vertical Flat and Circular Porous Microchannels. *Transport in Porous Media*. 2018, 124(3): 919 – 941. DOI: 10.1007/s11242-018-1104-4
18. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I.* Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 106: 1164 – 1173. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.096>
19. *Nield D.A., Bejan A.* Convection in Porous Media. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-5541-7>

Отримано 28.01.2025

Received 28.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025

УДК 620.92

ТРУБЧАТИЙ ТЕПЛООБМІННИК СПІРАЛЬНОГО ТИПУ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

Русанов Р.А.¹, доктор філософії, Русанов А.В.², академік НАН України, Дегтярьов К.Г.³, кандидат технічних наук, Крютченко Д.В.⁴, доктор філософії

¹старший науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2930-2574>

²директор Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9957-8974>

³науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, wollydenis@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6804-6991>

⁴старший науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, kdeg89@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4486-2468>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.6>

Робота присвячена аналізу методики розрахунку трубчастого теплообмінника, який використовується для роботи з енергоносіями при високих температурах. Теплообмінники такого типу широко застосовуються в різних галузях промисловості. У даній роботі розглядається методика розрахунку трубчастого теплообмінника, призначеного для роботи з енергоносіями при високих температурах. Такі теплообмінники широко використовуються в різних галузях промисловості, включаючи енергетику, нафтохімію, металургію та харчову промисловість. Ефективність їхньої роботи безпосередньо впливає на енергозбереження та загальну продуктивність технологічних процесів. У дослідженні наведено основні принципи теплового та гідравлічного розрахунку теплообмінника, включаючи визначення теплових потоків, коефіцієнтів теплопередачі, температурних напорів та втрат тиску в системі. Розглянуто методи оптимізації теплообмінного процесу, спрямовані на підвищення ефективності роботи обладнання за рахунок вибору матеріалів, геометричних параметрів та режимів експлуатації.

This paper examines the methodology for calculating a tubular heat exchanger designed to operate with energy carriers at high temperatures. Such heat exchangers are widely used in various industries, including energy, petrochemicals, metallurgy, and the food industry. Their efficiency directly impacts energy savings and the overall productivity of technological processes. The study presents the main principles of thermal and hydraulic calculations of the heat exchanger, including the determination of heat flows, heat transfer coefficients, temperature gradients, and pressure losses in the system. Methods for optimizing the heat exchange process are considered, aimed at improving equipment efficiency by selecting appropriate materials, geometric parameters, and operating modes.

Бібл. 9, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: трубчастий теплообмінник, тепловий розрахунок, теплопередача, температурний напір, енергоносіє, ефективність теплообміну.

Вступ. Теплообмінники — це пристрої, які використовуються для ефективного обміну теплом між двома або більше рідинами або газами. Існує кілька видів теплообмінників: пластинчасті, трубчасті, роторні, повітряно-водяні, теплообмінники з оболонкою та трубами.[1]

Трубчасті теплообмінники широко застосовуються в різних галузях промисловості як в Україні так і в усьому світі. Зокрема в енергетиці, металургії, хімічній та нафтохімічній промисловості. Їхнє дослідження та вдосконалення мають особливу актуальність через зростаючі вимоги до ефективності, надійності та безпеки роботи обладнання в умовах екстремальних

температур і агресивних середовищ. Варто зазначити стрімке розповсюдження та зростання значення високотемпературної енергетики у світі. Підвищення ефективності парових і газових турбін потребує нових, більш точних підходів та рішень у теплообмінниках, також посилення екологічних стандартів щодо зменшення викидів CO₂ стимулює розробку ефективних теплообмінних систем, які зменшують втрати тепла та енергоспоживання. [2]

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Теплообмінні апарати відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної роботи енергогенеруючих установок, сприяючи оптимальному перенесенню тепла

між робочими середовищами при мінімальних енергетичних втратах. Останні дослідження та публікації у цій сфері зосереджені на підвищенні теплової ефективності, збільшенні довговічності обладнання, а також розробці інноваційних матеріалів і конструкцій. Сучасні дослідження приділяють особливу увагу оптимізації геометрії теплообмінників, зокрема спіральних, пластинчастих і кожухотрубних конструкцій, для покращення теплопередачі. Використання методів комп'ютерного моделювання (CFD) [3] та експериментальних підходів дозволяє оцінювати коефіцієнти теплопередачі, втрати тиску та температурні градієнти, що сприяє підвищенню ефективності роботи теплообмінного обладнання в паро- та газотурбінних циклах. Останні публікації [8-9] висвітлюють розробку термостійких матеріалів, зокрема спеціальних сплавів і керамічних покриттів, що подовжують термін служби теплообмінників в екстремальних умовах. Запровадження антикорозійних покриттів і самоочисних поверхонь дозволяє зменшити забруднення та підвищити довговічність обладнання на енергетичних об'єктах.

Дослідження трубчастих теплообмінників для роботи в екстремальних умовах є важливим як для світової промисловості, так і для України. Вдосконалення конструкцій, застосування нових матеріалів та підвищення ефективності теплообміну сприятиме розвитку енергетики, промисловості та оборонного сектору, забезпечуючи економічну вигоду та екологічну безпеку.

Вибір типу теплообмінника залежить від умов експлуатації, необхідної продуктивності, вартості та інших факторів. Трубчасті теплообмінники ідеально підходять для використання в умовах високого тиску і

високої температури. Також їх легко встановлювати, демонтувати, відносно легко виготовляти та обслуговувати, тому в розрахунку вирішено використовувати саме цей тип теплообмінника. Також обрана конструкція теплообмінника має довгий експлуатаційний період, що дозволяє його використання у механізмах, які не потребують регулярного технічного обслуговування.

Постановка проблеми. Підбір теплообмінника для ефективного теплообміну в промислових установках значною мірою залежить від конструкції та розрахунку теплообмінного обладнання. Трубчасті теплообмінники широко використовуються в енергетиці, хімічній та нафтохімічній промисловості, оскільки забезпечують високу ефективність теплопередачі та довговічність.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Метою даної роботи є розробка методики розрахунку трубчастого теплообмінника, що працює при високих температурах (1000 °C та 700 °C), для забезпечення ефективного теплообміну та довговічності обладнання.

Методика проведення досліджень.

Дослідження трубчастого теплообмінника, що працює при високих температурах, включає комплексний підхід.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів.

В роботі було створено геометричні моделі та розраховано 2 типи теплообмінників трубного типу.

Спочатку використано наступну теплову схему.

Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів, яка представлена на рис. 1 працює за циклом Брайтона, зараз ми розглядаємо тепло- обмінний апарат у наданому циклі.

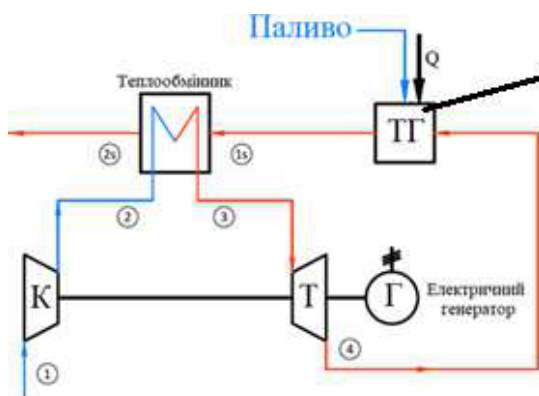


Рис. 1. Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів

Fig. 1. Highly efficient electricity generating plant based on the use of uncertified biofuel from agricultural waste

Таблиця 1. Параметри повітря

Table 1. Air parameters

Вихід газу	Вихід повітря
1134 К	587 К

Граничні умови задачі виглядають наступним чином:

Внутрішній діаметр зовнішньої труби – 0.55 м (адіабатний процес);

Діаметр внутрішньої труби – 0.272 м;

Довжина 16.39 м зовнішньої труби – граничні умови 3го роду зовні ($a = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, 273 К).

Щоб розрахувати необхідну довжину труби для нагрівання холодного повітря від 116°C до 600°C, використовуючи гаряче повітря з температурою 1000°C на вході і 200°C на виході, масова витрата повітря $35/5=0.7 \text{ кг/с}$, використаємо закон теплопередачі і врахуємо геометрію теплообмінника.

Вхідні дані:

температура холодного повітря на вході: 116 С;

температура холодного повітря на виході: 600 С;

температура гарячого повітря на вході: 1000 С;

температура гарячого повітря на виході: 200 С;

масова витрата холодного повітря: 0.7 кг/с;

коефіцієнт теплопередачі $U=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

діаметр труби з холодним повітрям: $D=0.272 \text{ м}$.

Теплову потужність, необхідну для нагріву холодного потоку, можна визначити за формулою:

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_x c \Delta T \quad (1)$$

де:

$\dot{m}_x=0.7 \text{ кг/с}$ — масова витрата холодного повітря,

$c=1005 \text{ Дж}/(\text{кгК})$ — питома теплоємність повітря,

$$\Delta T = 600 \text{ С} - 116 \text{ С} = 484 \text{ К}. \quad (2)$$

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_x c \Delta T = 0.7 \cdot 1005 \cdot 484 = 340,3 \text{ Дж} / \text{с};$$

Для теплообміну в умовах протитечії (зустрічних потоків) середня логарифмічна різниця температур визначається за формулою [5]:

$$\Delta T_{\text{сер.лог.}} = \frac{(T_{\text{г.вх.}} - T_{\text{х.вих.}}) - (T_{\text{г.вих.}} - T_{\text{х.вх.}})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{г.вх.}} - T_{\text{х.вих.}})}{(T_{\text{г.вих.}} - T_{\text{х.вх.}})} \right)}; \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{(1000 - 600) - (200 - 116)}{\ln \left(\frac{(1000 - 600)}{(200 - 116)} \right)} = \frac{400 - 84}{\ln \left(\frac{400}{84} \right)} = 242.9 \text{ К};$$

Формула для теплопередачі:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{сер.лог.}}; \quad (4)$$

де:

$$\dot{Q} = 340,3 \text{ Дж/с};$$

$$U = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К});$$

$$\Delta T = 242.9 \text{ К}.$$

Знайдемо необхідну площу поверхні теплообміну А:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{\text{сер.лог.}}} = \frac{340.3}{50 \cdot 242.9} = 28 \text{ м}^2$$

Для теплообмінника типу "труба в трубі" площа поверхні теплообміну визначається як [6]:

$$A = \pi \cdot D_{\text{сер.}} \cdot L; \quad (5)$$

де:

$$D_{\text{сер.}} = 0.272 \text{ м},$$

L — довжина труби.

Знайдемо довжину труби L :

$$L = \frac{A}{\pi D_{\text{сер.}}} = \frac{28}{\pi \cdot 0.272} = 32.77 \text{ м}; \quad (6)$$

Результати попереднього розрахунку свідчать, що для 5 труб з діаметром 0.272 метри, необхідна довжина складає 32.77 метри.

Збільшення кількості трубчастих елементів прямо пропорційне зменшенню їх довжини [4], наприклад, при використанні десяти труб загальна довжина теплообмінника складе:

$$L = \frac{32.77}{2} = 16.39 \text{ м};$$

На рисунку 2, 3 зображено розподілення температури та швидкості повітря по теплообміннику.

На рисунку 4 зображена загальна геометрія трубчастого теплообмінника.

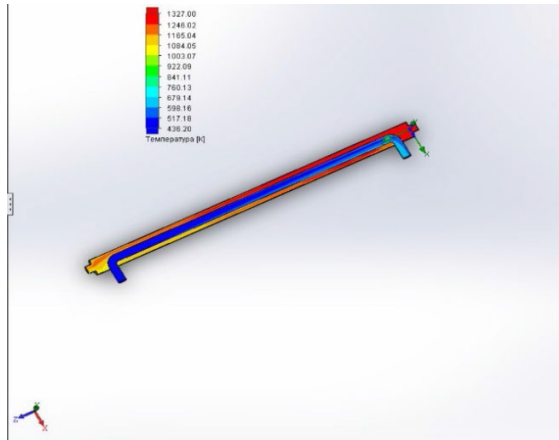


Рис. 2. Розподілення температур, К
Fig. 2. Temperature distribution, K

Далі оптимізовано параметри спіральної труби:

Довжина труби: розраховано, що для прямої труби необхідна довжина становить 16.39 метрів для кожної труби. Крок спіралі (h): це відстань між сусідніми витками спіралі по вертикалі. Радіус спіралі (R): це відстань від центру спіралі до осі труби. Кількість витків (N): залежить від загальної довжини труби і радіуса спіралі. Розрахунок довжини спіральної труби

Довжина спіральної труби визначається за формулою

$$L = N \cdot \sqrt{(2\pi R)^2 + h^2}; \quad (7)$$

де:

L — загальна довжина труби (в метрах),

N — кількість витків,

R — радіус спіралі (в метрах),

h — крок спіралі (в метрах).

Визначимо кількість витків і крок спіралі.

Вибір радіуса спіралі та кроку залежить від конструктивних обмежень.

Нехай радіус спіралі становить 0.5 метра. Тоді кожен виток по горизонталі матиме довжину:

$$L = 2\pi R = 2\pi \cdot 0.5 = 3.14 \text{ м}; \quad (8)$$

Якщо загальна довжина труби L повинна бути 16.39 метрів, кількість витків без урахування вертикального підйому буде:

$$N = \frac{L}{L_{\text{один виток}}} = \frac{16.39}{3.14} \approx 5.22 \text{ витків};$$

Крок спіралі h становить $h=0.5$ м (50 см між витками по вертикалі).

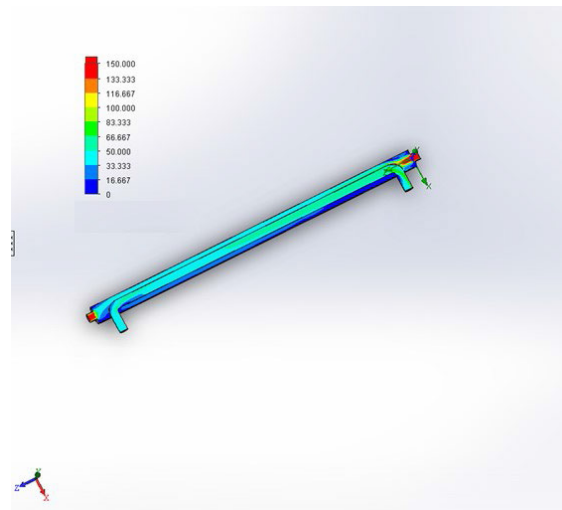


Рис. 3. Швидкість повітря у теплообміннику, м/с
Fig. 3. Air speed in the heat exchanger, m/s



Рис. 4. Загальна геометрія теплообмінника.
Теплообмінник спірального типу
Fig. 4. General geometry of the heat exchanger
Spiral type heat exchanger

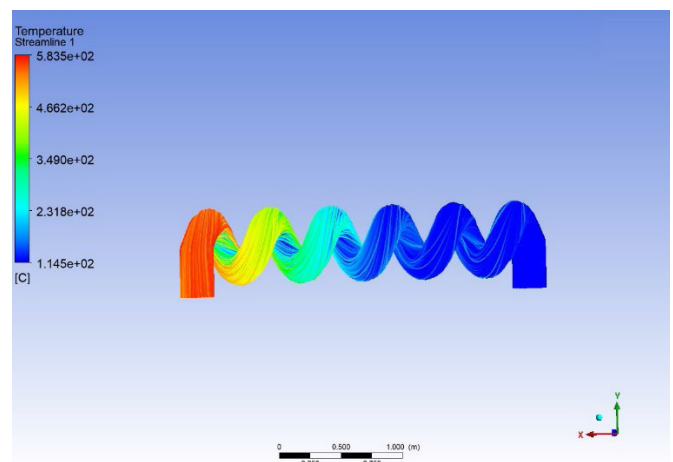


Рис. 5. Розподілення температури вздовж спіральної труби, С

Fig. 5. Temperature distribution along the spiral pipe, C

$$L = N \cdot \sqrt{(2\pi R)^2 + h^2} = 16.2 \text{ м};$$

На рисунку 5, 6 зображено розподілення температур та швидкості енергоносія у спіральній трубі.

На рисунку (7) представлено розподілення швидкості у спіральній камері/трубі.

Проміжні результати комп'ютерного аналізу свідчать, що розраховані швидкість та тиск знаходяться у діапазоні шуканих параметрів у спіральній трубі діаметром 0.272м, тому для труби з більш великим діаметром ці параметри будуть ще кращі.

Далі перейдемо до дослідження зовнішньої труби діаметром 0.8м.

На рис. 8, 9 зображено розподілення температур та швидкостей у трубі.

На рисунку 10 зображено входи та виходи гарячого повітря температурою 1000 C та холодного повітря температурою 240 C.

Теплообмінник включає наступні основні конструктивні елементи: корпус, трубний спіраль, вхідні та вихідні патрубки для енергоносіїв.

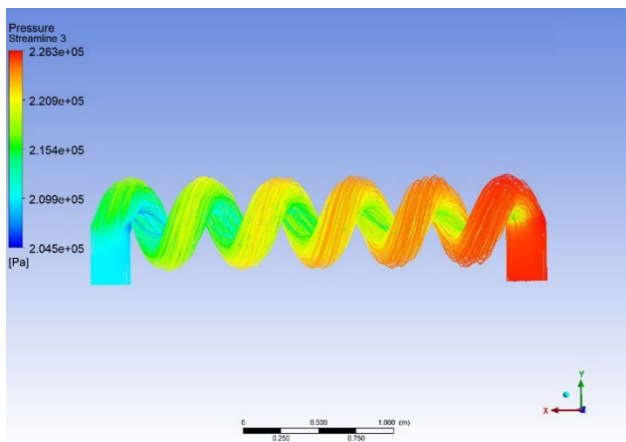


Рис. 6. Розподілення тиску вздовж спіральної труби, Pa

Fig. 6. Pressure distribution along the spiral pipe, Pa

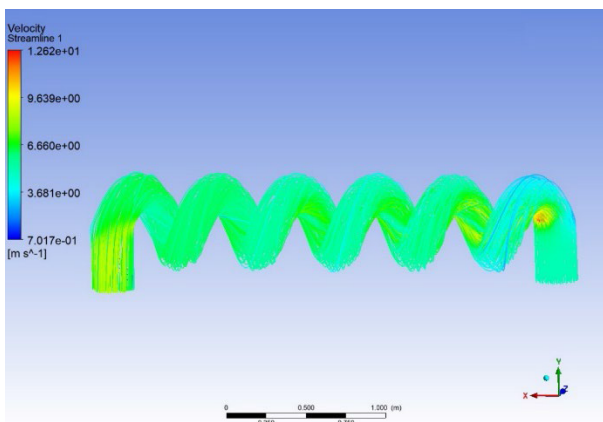


Рис. 7. Розподілення швидкості вздовж спіральної труби, м/с

Fig. 7. Velocity distribution along the spiral pipe, m/s

Щоб нагріти холодне повітря з 116°C до 600°C, використовуючи гаряче повітря з 1000°C на вході і 200°C

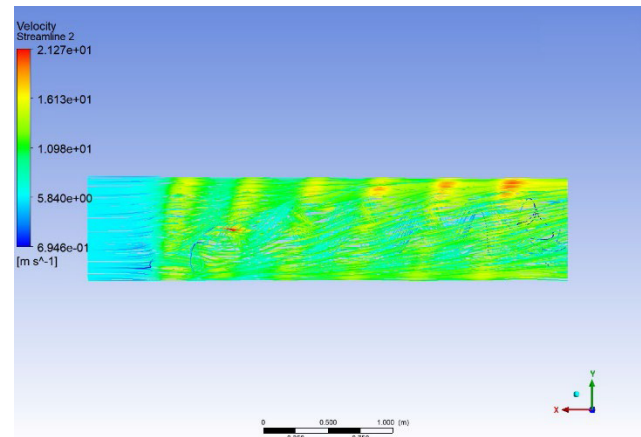


Рис. 8. Розподілення швидкості вздовж труби, м/с

Fig. 8. Velocity distribution along the pipe, m/s

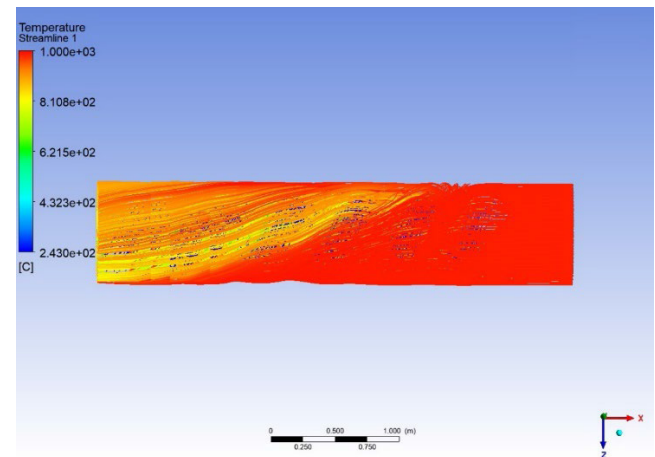


Рис. 9. Температура на вздовж труби, C

Fig. 9. Temperature along the pipe, C

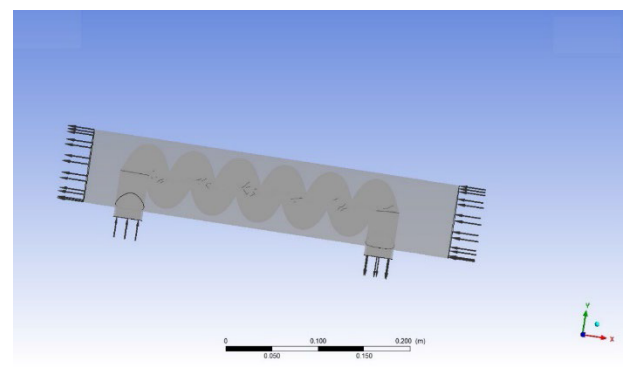


Рис. 10. Входи та виходи повітря у теплообміннику

Fig. 10. Air inlets and outlets in the heat exchanger

на виході, при діаметрі труби 0.272 м з масовою витратою 0.7 кг/с потрібно використовувати 5 труб, необхідна довжина кожної труби з холодним повітрям складе приблизно 32.77 метра. Тобто, з метою підвищення компактності конструкції, можна використовувати не 5 труб з діаметром 0.272 метри і довжиною 32.77 метри, а 10 труб довжиною 16.39 метри з масовою витратою 0.35 кг/с і діаметром 0.272 метри.

Висновки.

Розроблено, засновану на методі скінченних елементів, методику комп'ютерного розрахунку трубчастого теплообмінника, який працює при високих температурах.

Запропоновано конструкцію принципово нового трубчастого теплообмінника для роботи в екстремальних умовах.

Проведено розрахунки параметрів трубчастого теплообмінника, призначеного для роботи з енергоносіями при високих температурах.

Наведено основні принципи теплового та гідравлічного розрахунку теплообмінника, його температурних напорів, тиску.

Подяка.

Робота виконана за підтримки грантів НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2024-2025 рр. "Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів."

ЛІТЕРАТУРА

1. Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Vyshnievskiy V.M., Hrakov D.P., Hrakov O.P. Sushinnya bilokachannoyi kapusty na konvektyvniy sushartsi [Drying white cabbage on a convective drying stand]. Thermophysics and thermal power engineering, 2021; 43 (3), 24-29. (in Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.3>
2. Rusanov, A., Chugay, M., Rusanov, R. Advanced Computer Technologies in the New Flow Part Development for Reactive Type HPC Steam Turbine of T-100 Series. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 55–63, https://doi.org/10.15407/10.1007/978-3-031-18487-1_6
3. A Rusanov, A. V., Shvetsov, V. L., Kosianova A. I., Bykov Yu. A., Pashchenko, N. V., Chugay M. A., Rusanov, R. A. The gas-dynamic efficiency increase of the K-300 series steam turbine control compartment. J. of Mech. Eng., 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.006>
4. E Strelnikova, N Choudhary, K Degtyariv, D Kriutchenko, I Vierushkin, Boundary element method for hypersingular integral equations: Implementation and applications in potential theory. Engineering Analysis with Boundary Elements 169. 2024. 105999. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>
5. Denys Kriutchenko, Elena Strelnikova, Yuriy Naumenko, Olga Zaydenvarg. Boundary Element Methods for Hypersingular Integral Equations Over Circular Domains. The Fundamentals of Boundary Element Methods. 2024.Pp-73-77. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>
6. Avramenko, A.M., Shevchenko, A.A., Chorna, N.A., Kotenko, A.L. Application of highly efficient hydrogen generation and storage systems for autonomous energy supply. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2021, 2021(3), pp 69–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/069>
7. O. Sierikova, E. Strelnikova, K. Degtyariv. Numerical Simulation of Strength and Aerodynamic Characteristics of Small Wind Turbine Blades (2023) Lecture Notes in Networks and Systems, 657 LNNS, pp. 357 - 370. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-36201-9_31
8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modelling. Open Engineering (formerly Central European Journal of Engineering) 2015, Vol. 5, pp. 399-410 <https://doi.org/10.1515/eng-2015-0047>
9. Rusanov, A., Subotin, V., Rusanov, R. et al. Development of the flow part of reactive type hpc of k-325-23.5 series steam turbine based on the use of modern computer technologies, Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 24. No. 4. P. 6-16 . <https://doi.org/10.15407/pmach2021.04.006>

SPIRAL-TYPE TUBULAR HEAT EXCHANGER FOR HIGH-EFFICIENCY POWER GENERATION UNIT

R.A. Rusanov¹, A.V. Rusanov², D.V. Kriutchenko³,
K.G. Degtyarev⁴.

¹senior researcher, Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2930-2574>

²director of Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9957-8974>

³researcher, Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, wollydenis@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6804-6991>

⁴senior researcher, Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, kdeg89@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4486-2468>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.6>

This paper examines the methodology for calculating a tubular heat exchanger designed to operate with energy carriers at high temperatures. Such heat exchangers are widely used in various industries, including energy, petrochemicals, metallurgy, and the food industry. Their efficiency directly impacts energy savings and the overall productivity of technological processes.

The study presents the main principles of thermal and hydraulic calculations of the heat exchanger, including the determination of heat flows, heat transfer coefficients, temperature gradients, and pressure losses in the system. Methods for optimizing the heat exchange process are considered, aimed at improving equipment efficiency by selecting appropriate materials, geometric parameters, and operating modes.

Special attention is given to the selection of structural parameters of the heat exchanger that ensure an optimal balance between heat transfer efficiency, energy consumption, and equipment durability. Factors affecting

corrosion resistance and mechanical reliability of the structure are analyzed, along with methods to prevent contamination and fouling of the heat exchange surface.

The results obtained can be used for the development of new heat exchangers or the modernization of existing ones to enhance their performance and reduce energy costs.

References 9, tables 1, figures 10.

Keywords: tubular heat exchanger, thermal calculation, heat transfer, temperature head, energy carrier, heat transfer efficiency.

1. Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Vyshnievskiy V.M., Hrakov D.P., Hrakov O.P. Sushynnya bilokachannoyi kapusty na konvektyvniy susharts [Drying white cabbage on a convective drying stand]. Thermophysics and thermal power engineering, 2021; 43 (3), 24-29. (in Ukr.)

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.3>

2. Rusanov, A., Chugay, M., Rusanov, R. Advanced Computer Technologies in the New Flow Part Development for Reactive Type HPC Steam Turbine of T-100 Series. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 55–63, https://doi.org/10.15407/10.1007/978-3-031-18487-1_6

3. A Rusanov, A. V., Shvetsov, V. L., Kosianova A. I., Bykov Yu. A., Pashchenko, N. V., Chugay M. A., Rusanov, R. A. The gas-dynamic efficiency increase of the K-300 series steam turbine control compartment. J. of Mech. Eng., 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.006>

4. E Strelnikova, N Choudhary, K Degtyariev, D Kriutchenko, I Vierushkin, Boundary element method for hypersingular integral equations: Implementation and applications in potential theory. Engineering Analysis with Boundary Elements 169. 2024. 105999. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

5. Denys Kriutchenko, Elena Strelnikova, Yuriy Naumenko, Olga Zaydenvarg. Boundary Element Methods for Hypersingular Integral Equations Over Circular Domains. The Fundamentals of Boundary Element Methods. 2024.Pp-73-77. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

6. Avramenko, A.M., Shevchenko, A.A., Chorna, N.A., Kotenko, A.L. Application of highly efficient hydrogen generation and storage systems for autonomous energy supply. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2021, 2021(3), pp 69–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/069>

7. O. Sierikova, E. Strelnikova, K. Degtyariev. Numerical Simulation of Strength and Aerodynamic Characteristics of Small Wind Turbine Blades (2023) Lecture Notes in Networks and Systems, 657 LNNS, pp. 357 - 370. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-36201-9_31

8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modelling. Open Engineering (formerly Central European Journal of Engineering) 2015, Vol. 5, pp. 399-410
<https://doi.org/10.1515/eng-2015-0047>

9. Rusanov, A., Subotin, V., Rusanov, R. et al. Development of the flow part of reactive type hpc of k-325-23.5 series steam turbine based on the use of modern computer technologies, Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 24. No. 4. P. 6-16 .
<https://doi.org/10.15407/pmach2021.04.006>

Отримано 30.01.2025

Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 662.767.2.

МОЖЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПЕРЕДОВОГО БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК. ЧАСТИНА 2.

Гелетука Г.Г.¹, докт. техн. наук, Гивель М.М.², магістр, Кучерук П.П.³ канд. техн. наук, Сидоренко М.Р.⁴, бакалавр

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, завідувач відділу, geletukha@uabio.org, <https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>

²ТОВ "НТЦ "Біомаса" 03067, вулиця Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, консультант, hyvel@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8740-714X>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, kucheruk@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний інженер, sydorenko@secbiomass.com, <https://orcid.org/0009-0002-0006-6504>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.7>

Розглянуто особливості фізіологічних стратегій вирощування мікробіодоростей та проаналізовано оптимальні умови для вирощування мікробіодоростей. Розглянуто особливості роботи плоскостельних фотобіореакторів та проаналізовано залежність продуктивності вирощування мікробіодоростей від співвідношення освітленої площі поверхні фотобіореактора до об'єму культуральної рідини в ньому. Наведено попередні оцінки масового балансу основних компонентів для вирощування мікробіодоростей на дигестаті та оптимального співвідношення маси суспензії мікробіодоростей до маси соломи при їх сумісному анаеробному зброджуванні. Наведено попередню оцінку техніко-економічних показників вирощування мікробіодоростей у фотоавтотрофному режимі в плоскостельних фотобіореакторах, з використанням CO₂ від збагачення біогазу до біометану та рідкої фракції дигестату.

The features of the physiological strategies of growing microalgae are considered and the optimal conditions for growing microalgae are analyzed. The peculiarities of the operation of flat-panel photobioreactors were considered, and the dependence of microalgae growth productivity on the ratio of the illuminated surface area of the photobioreactor to the volume of the culture liquid in it was analyzed. Preliminary estimates of the mass balance of the main components for growing microalgae on digestate and the optimal ratio of the mass of the microalgae suspension to the mass of straw during their co-digestion are given. A preliminary evaluation of technical and economic indicators of growing microalgae in photoautotrophic mode in flat-panel photobioreactors, using CO₂ from biogas upgrading to biomethane and liquid digestate fraction, is given.

Бібл. 33, табл. 7, рис. 2.

Ключові слова: біогаз, передовий біометан, мікробіодорості, дигестат, біопалива третього покоління.

БГУ – біогазова установка;

МВ – мікробіодорості;

РФД – рідка фракція дигестату;

ТФД – тверда фракція дигестату;

СОР – сухі органічні речовини;

САРЕХ – капітальні витрати;

ОРЕХ – операційні витрати;

ФБР – фотобіореактор.

Актуальність роботи обумовлена метою ЄС та України щодо декарбонізації їх економік за рахунок використання відновлюваної енергії та низьковуглецевого палива. Сьогодні одним із найбільш економічно вигідних варіантів для цього є виробництво біометану. Існує потреба в інноваційному недорогому виробництві біометану з альтернативної високопродуктивної біомаси, яка може використовувати вихідну сировину з відходів. Водорості та ціанобактерії (далі – мікробіодорості) є такою перспективною біомасою, яка може використовувати багатий на поживні речовини дигестат та CO₂, як

побічний продукт збагачення біометану, для вирощування цінної біомаси, що використовується для виробництва передового біопалива (Директива ЄС RED II, Додаток 9). **Метою** роботи є продовження огляду, наведеного в частині 1 статті [1], більш повний аналіз технологій та обладнання для вирощування мікробіодоростей (МВ), попередня оцінка техніко-економічних показників технології вирощування мікробіодоростей на біогазових заводах з отриманням додаткового виходу біометану з використанням РФД. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Фізіологічні стратегії вирощування мікроводоростей: фотоавтотрофне, гетеротрофне та міксотрофне культивування

В залежності від джерела вуглецю і енергії можна виділити 3 способи культивування МВ: фотоавтотрофний, гетеротрофний та міксотрофний. Спосіб культивування МВ суттєво впливає на метаболізм та швидкість росту мікроводоростей і визначає якість біомаси МВ та загальну продуктивність процесу. Як і більшість наземних рослин, переважна більшість мікроводоростей

реалізують фотоавтотрофний тип живлення. У той же час, деякі види мікроводоростей здатні реалізовувати гетеротрофний, в якому використовуються органічні сполуки як джерело вуглецю та енергії, тому їм не потрібне світло. Види МВ, які проявляють одночасно властивості фотоавтотрофів та гетеротрофів, називають міксотрофами. Приріст біомаси МВ в фотоавтотрофному режимі відбувається за рахунок фіксації CO_2 в процесі фотосинтезу, тоді як в гетеротрофному – за рахунок реакцій катаболізму доступних органічних спо-

Таблиця 1. Порівняльна характеристика різних режимів культивування МВ на дигестаті біогазових установок з використанням CO_2 від збагачення біогазу

Table 1. Comparative characteristics of different cultivation modes of microalgae for cultivation in digestate of biogas plants using CO_2 from biogas upgrading

	Фотоавтотрофне	Гетеротрофне	Міксотрофне
Джерело вуглецю	Неорганічний вуглець (CO_2 , бікарбонати)	Органічний вуглець (глюкоза, фруктоза, ацетат, сахароза, інші)	Неорганічний і органічний вуглець
Джерело енергії	Світло	Органічні речовини (глюкоза, фруктоза, ацетати, сахароза, інші)	Світло і органічні речовини
Наявність світла	Обов'язкова	Не потребується, світло є інгібітором процесу	Потреба в освітленні нижча, ніж для фотоавтотрофного росту
Продуктивність культивування МВ	Низька (ефект самозатінення) <i>Chlorella sp.</i> 0,35-0,4 г/(л•добу) [4]	В 2,2 рази вище, ніж в фотоавтотрофному. Вищий рівень контролю за процесом вирощування. Високі концентрації біомаси, іноді понад 100 г/л [2, 3] <i>Chlorella sp.</i> 1,7-4 г/(л•добу) [4]	Висока: в 5-15 разів вище, ніж в фотоавтотрофному <i>Chlorella sp.</i> 3-5,18 г/(л•добу) [4]
Переваги	Дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Менший ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті	Співвідношення поверхні до об'єму біореактора, на відміну від фотоавтотрофного режиму, не є лімітуючим фактором швидкості приросту біомаси МВ. Висока продуктивність і відсутність потреби у освітленні зменшують витрати на виробництво	Дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Потреба в освітленні нижча, ніж для фотоавтотрофного режиму
Недоліки	При використанні штучного освітлення збільшуються витрати на вирощування. Нижча продуктивність, ніж при гетеротрофному та міксотрофному культивуванні МВ. Співвідношення поверхні до об'єму біореактора буде одним з лімітуючих факторів швидкості приросту біомаси МВ	Не дозволяє зменшити викиди парникових газів за рахунок споживання CO_2 від збагачення біогазу. Високий ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті.	Високий ризик контамінації процесу сторонніми мікроорганізмами, що містяться в дигестаті. Співвідношення поверхні до об'єму біореактора буде одним з лімітуючих факторів швидкості приросту біомаси МВ

лук, наприклад глюкози, фруктози, ацетатів та інших сполук.

Кожен з цих способів культивування має свої переваги та недоліки при їх застосуванні в технології вирощування МВ дигестаті біогазових установок з використанням CO_2 від збагачення біогазу (Таблиця 1).

Ключовою перевагою фотоавтотрофного та міксотрофного способів культивування є можливість перетворення CO_2 від збагачення біогазу в додатковий обсяг передового біометану. Однак, міксотрофний режим виглядає більш перспективним за рахунок вищої продуктивності та можливості споживання залишкових органічних речовин, що містяться в дигестаті (ацетати), на приріст біомаси МВ. Ацетат в процесі анаеробного зброджування є термінальним продуктом розпаду комплексної органічної речовини, з якого, шляхом ацетокластичного метаногенезу, утворюється близько 70% метану в біогазі. Вміст ацетату в дигестаті біогазових установок може складати до 3 г/л [2, 3] і буде залежати від умов реалізації процесу анаеробного зброджування.

Додаткові можливості у застосуванні міксотрофного способу культивування МВ можуть бути пов'язані із внесенням органічних речовин у складі субстратів, які одночасно можуть використовуватись при безпосередньому виробництві з них біогазу, наприклад, меляси, молочної сироватки, тощо. В роботах [7, 8, 9, 29] показано, що гній худоби, меляса, харчові відходи, стічні води та молочна сироватка після відповідної попередньої обробки, є органічними субстратами, перспективними для гетеротрофного та міксотрофного вирощування МВ.

Всі розглянуті у частині 1 статті [1] типи МВ (*Euglena gracilis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella sp.*, *Scenedesmus*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Spirulina platensis*) мають здатність до міксотрофного культивування [5].

Оптимальні умови вирощування МВ

На ріст мікроводоростей в фотоавтотрофному та міксотрофному способі культивування впливають ряд факторів, зокрема: температура, рН, концентрація розчинених CO_2 та O_2 , солоність, інтенсивність освітлення та концентрація нутрієнтів в середовищі росту МВ [5]. Крім того, біохімічний склад біомаси МВ також залежить від їх виду, фази росту та від часу збору врожаю. Тому важливо враховувати безпосередній і комбінований вплив вищезгаданих факторів на швидкість росту та склад біомаси МВ.

Для забезпечення оптимального росту мікроводоростей потрібно створити відповідні умови культивування. Оптимальні та граничні умови вирощування та їх вплив на життєдіяльність МВ є індивідуальними для різних видів та штамів МВ. Разом з тим, для більшості видів МВ можна прийняти усереднені оптимальні умови культивування, як показано в таблиці 2.

Освітлення. На швидкість росту МВ впливають як інтенсивність, так і тривалість освітлення. Рекомендована інтенсивність освітлення складає 2000...4000 люкс [10]. При перевищенні рекомендованої інтенсивності освітлення відбувається фотоінгібування процесу фотосинтезу, в результаті чого дезактивуються білки у фотосинтетичних одиницях і, відповідно, знижується приріст біомаси МВ. Різні види мікроводоростей мають різну стійкість до фотоінгібування. Спектр поглинання світла мікроводоростями коливається в діапазоні від 400 до 700 нм, а їх фотосинтетичний апарат може сприймати максимальну інтенсивність світла (фотосинтетична активна радіація - ФАР) від 50 до 200 $\mu\text{моль фотон}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, залежно від виду [7].

Таблиця 2. Оптимальні умови росту мікроводоростей в фотоавтотрофному режимі [3-11]

Table 2. Optimal conditions for the growth of microalgae in the photoautotrophic mode [3-11]

Фактор	Оптимальні умови
Температура	20–30 °C
Інтенсивність освітлення	2000–4000 люкс
Тривалість освітлення	12:12 або 16:8 год (період світло-темрява)
Концентрація CO_2	2%–10%
Хімічна потреба в кисні (ХПК)	0,2-2 г/л
Час культивування	7-10 діб
Парціальний тиск, кПа	$\geq 0,1-0,2$
рН	7,0–9,0
CO_2/O_2	≈ 5
N/P (біодоступна форма)	≈ 16

Мікроводорості потребують відповідної тривалості освітлення, щоб максимізувати фотосинтетичну ефективність, ріст і продуктивність. Занадто мала або занадто велика тривалість освітлення може негативно вплинути на їх ріст і розвиток. Як правило, МВ найкраще ростуть за постійних циклів світло/темрява 12:12 або 16:8 годин [10].

Температура впливає як на розчинність вуглекислого газу в середовищі росту МВ, а відтак і його доступність для клітин МВ, так і на метаболічні процеси всередині клітин. Оптимальна температура для культивування мікроводоростей залежить від їх виду [11]. Для більшості видів оптимальна температура знаходиться в межах 20-30°C [12]. При таких температурах та атмосферному тиску розчинність CO_2 у воді становить 0,6-0,8 ммоль/л.

Величина рН. рН є одним з важливих факторів для росту мікроводоростей, оскільки він впливає на активність та синтез ферментів. Оптимальний діапазон рН для вирощування мікроводоростей також залежить від їх виду. Як правило, більшість мікроорганізмів живуть у діапазоні рН 7-9 [12].

CO_2 . Концентрація CO_2 в середовищі росту пропорційно впливає на швидкість його трансферу до клітин МВ, а відтак і швидкість їх росту. При цьому, для різних видів МВ існують оптимальні значення концентрації CO_2 , за яких темпи їх приросту залишаються найвищими. Підвищена концентрація CO_2 в середовищі створює стресові умови для клітин МВ, що призводить до збільшення частки ліпідів в біохімічному складі клітин, але при цьому значно знижується приріст

біомаси МВ. Найбільш стійкими до вуглекислого газу видами є *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.* та *Euglena gracilis*, а їхня максимальна продуктивність біомаси виявлена при концентраціях вуглекислого газу 10%, 10–20% та 5% відповідно [17].

Солоність впливає фізіологічні та біохімічні властивості МВ і загалом на їх ріст. При не оптимальній солоності пригнічується ріст МВ та споживання нітрогену з середовища їх росту [18]. В типовому середовищі для культивування мікроводоростей солоність складає від 0,5 до 3,5 г/л [19]. За толерантністю до солоності мікроводорості поділяють на три категорії: олігогалінові, коли вони можуть розвиватися лише у воді з низькою солоністю (солоність від 0,5 до 5 г/кг); мезогалінних, коли вони розвиваються в середовищі помірно солоної води (5-18 г/кг), і полігалінних, коли вони можуть розвиватися в сильно солоній воді (18-30 г/кг) [16].

Нутрієнти. Для росту мікроводоростей потрібні такі важливі компоненти як азот, фосфор і калій. Мікроелементи як правило вносять у вигляді сумішей враховуючи попередньо експериментально встановлену концентрацію кожного з мікроелементів для забезпечення активного росту МВ [20]. У таблиці 3 підсумовано основні компоненти, що входять до складу клітин мікроводоростей та їх функції в клітині.

Особливості плоскопанельних фотобіореакторів

Типовий фотобіореактор (ФБР) є трифазною системою, що включає рідку фазу (культуральне середовище), тверду фазу (клітини МВ), та газову фазу (CO_2 , O_2 , N_2). Світло іноді називають четвертою фазою. Розробка

Таблиця 3. Функції нутрієнтів при культивуванні МВ [20]

Table 3. Functions of nutrients in microalgae cultivation [20]

Компонент	Джерело (нутрієнт)	Функції	Діапазон концентрацій
Вуглець	CO_2 , HCO_3^- , CO_3^- та інші	Синтез вуглеводів, білків, ліпідів	1–10 г/л
Нітроген	NO_3^- , сечовина, аміак, N_2 та інші	Синтез амінокислот, нуклеїнових кислот, білків, пігментів, таких як хлорофіл і фікоціанін	10–2000 мг/л
Фосфор	Гідрофосфат, фосфат та інші	Частина кістяка ДНК і РНК, АТФ, фосfolіпідів та нуклеотидів	10–500 мг/л
Сульфур	Сульфати	Синтез амінокислот метіоніну та цистеїну	1–200 мг/л
K, Ca, Na, Mg та інші	Неорганічні солі	Підтримка структури та життєдіяльності клітин	0,1–100 мг/л
Fe, Zn, Mn, Pb, Cd, та інші	Неорганічні солі	Ко-ферментні фактори	0,01–10 мг/л
Фактори росту	Вітаміни B, C, E, та інші	Входять до складу коферментів	0,01–1000 мг/л

ефективного PBR вимагає розуміння взаємодії між параметрами середовища та біологічною реакцією [23].

Загальна базова конструкція плоскопанельних ФБР складається з двох паралельних пластин з тонким шаром суспензії мікробіодоростей між ними. Ефективна передача світла зазвичай досягається при товщині шару суспензії в кілька сантиметрів. Пластини ФБР, як правило, виготовляються з полівінілхлориду, полікарбонату, поліметилметакрилату, скла або поліетилену. Головною перевагою плоскопанельних ФБР є можливість досягнення високого співвідношення площі освітленої поверхні до об'єму культурального середовища.

Фотобіореактори з плоскими пластинами демонструють здатність для виробництва мікробіодоростей з продуктивністю від 5 до 15 г/(м²•добу), хоча і значення до 35 г/(м²•добу) було досягнуто при використанні стічної води як культурального середовища [5].

За допомогою плоских фотобіореакторів можливо досягти високої фотосинтетичної ефективності. Однак їм також притаманні деякі обмеження. Завдяки компактній конструкції можливі значні флуктуації температури та перегрів культури. Плоскі ФБР зазвичай охолоджуються шляхом оприскування поверхні водою, яку можна зібрати для подальшого повторного використання.

Для максимальної продуктивності мікробіодоростей зона світлового насичення повинна бути рівномірно розповсюджена по всьому об'єму ФБР, що загалом неможливо зробити в умовах масштабного культивування. Застосування перемішування забезпечує циркуляцію клітин водоростей між зонами, знижуючи ефект фотоінгібування на освітленій поверхні та втрату біомаси в зоні темряви [24].

У фотобіореакторах завжди існує градієнт освітленості, обумовлений поглинанням світла і взаємного затінення клітин. Світловий режим у реакторі визначається світловим градієнтом і швидкістю циркуляції рідини. У межах об'єму біореактора одночасно можна виділити кілька ділянок з різною інтенсивністю світла, а саме: повної темряви, світлового лімітування, світлового насичення, світлового інгібування. Зони повної темряви і фотоінгібування є несприятливими ділянками для росту водоростей. Інтенсивність падаючого світла, що завжди використовується як показник забезпечення світлом, мало характеризує справжні світлові умови у ФБР. Кращою характеристикою світлових умов у реакторі є середня інтенсивність світла. Концепція середньої інтенсивності світла базується на припущенні, що клітини мікробіодоростей при перемішуванні суспензії протягом короткотривалого часу перебувають у різних світлових умовах, що еквівалентно постійному перебуванню в умовах середньої інтенсивності світла.

Для створення сприятливих умов освітлення у ФБР потрібно максимально збільшити відношення освітлюваної поверхні ФБР до його об'єму (S/V). Співвідношення (S/V) є одним з найбільш важливих параметрів, які характеризують фотобіореактор. Залежність продуктивності біомаси від співвідношення V/S наведено на рис. 1 (V – в літрах, S – в м²).

Перехід від лабораторних установок до промислових, так зване масштабування, викликає великі труднощі. Для роботи великомасштабних ФБР рекомендується концентрація МВ вище 1,0 г/л. Концентрація МВ має великий вплив на економічність процесу та впливає на розмір реактора. Чим вища концентрація біомаси, тим менший необхідний об'єм реактора. Оптимальне співвідношення S/V визначається в діапазоні

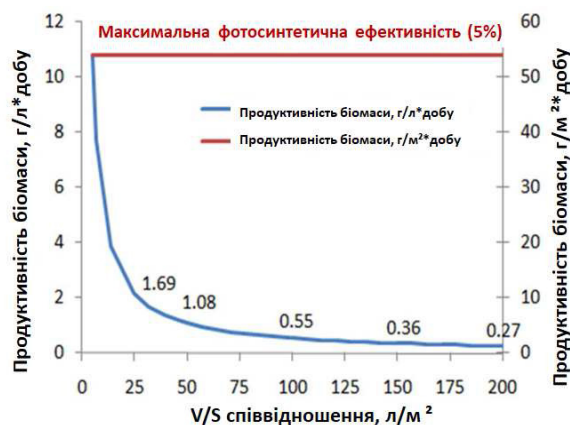


Рис. 1. Зміна продуктивності біомаси МВ при зміні співвідношення V/S для плоских фотобіореакторів [7]

Fig. 1. Change in microalgae biomass productivity with changing V/S ratio for flat photobioreactors [7]

43–73 м²/м³ для різних типів ФБР. Вищі значення співвідношення S/V можуть призвести до фотоінгібування та перегріву культури [23].

В таблицях 4 та 5 наведено результати розрахунку продуктивності вирощування біомаси МВ при різних розмірах установок культивування МВ та співвідношеннях V/S, на основі даних, приведених на рис. 1.

Згідно з вимірюваннями А. А. Циганкова (2001), при концентрації клітин *Anabaena variabilis* усього лише 0,6 г сухої біомаси/л суспензії шар культури товщиною 1 см поглинає 90% світлового потоку, і лише 1% світла досягає глибини 2 см. При більшій концентрації біомаси загасання світлового потоку відбувається ще швидше. Це добре видно з результатів вимірювання падіння щільності потоку фотонів при заглибленні в суспензію культури одноклітинної зеленої водорості *Euglena gracilis* [24]. Саме тому перші спроби використання для вирощування мікроводоростей звичайних ємностей зі значною (більше 5 см) товщиною шару суспензії призводили до дуже низьких виходів їх біомаси [24].

Для кожної культури існує оптимальна товщина плоскостанельного фотобіореактора, обумовлена компромісом між пригніченням глибинних шарів через нестачу світла і інгібуванням поверхневого шару культури світлом надмірної інтенсивності. У разі двобічного освітлення продуктивність культури зростає вдвічі.

Ризики біологічного обростання та зовнішнього забруднення можливо подолати або принаймні звести до мінімуму використанням одноразових реакторів з плоскими пластинами, що також суттєво знижує витрати на цей тип реактора. З цією метою був запатен-

тований реактор Green-Wall. Конструкція реактора складається з гнучкого прозорого поліетиленового пакета, який міститься між двома жорсткими залізними рамами, що обмежують відносно тонку вертикальну панель. Установка площею 400 м², що складається з 18 плоских реакторів 1,5 м³ була встановлена в Токопілла, Чилі, підключена до електростанції для використання димових газів як джерела вуглецю для виробництва мікроводоростей [33].

Попередня оцінка масового балансу CO₂ і нутрієнтів для вирощування мікроводоростей на дигестаті біогазових установок

Концепція вирощування МВ на дигестаті біогазових установок викладена в [1]. Оцінимо очікувані параметри і необхідну кількість CO₂ і поживних елементів (N, P, K) для вирощування МВ в автотрофному режимі в плоскопанельному ФБР з метою досягнення продуктивності вирощування 5 г/(л•добу).

Висока каламутність дигестату та високі концентрації аміаку, зумовлюють потребу в попередньому розведенні його водою або фільтрації. Для досягнення необхідної концентрації N, P, K та прозорості культурального середовища, концентрацію рідкого дигестату у воді потрібно забезпечувати на рівні 2-5% (2-5% - рідкого дигестату, 95-98% - чиста вода).

Враховуючи те, що CO₂ є в достатній кількості на біометанових заводах, а також те, що потребу в достатній кількості органічного вуглецю для гетеротрофного або міксотрофного способів культивування неможливо буде забезпечити при розведенні дигестату до 2-5% розчину з водою, передбачається, що буде реалізовуватись фо-

Таблиця 4. Продуктивність біомаси при граничних значеннях співвідношення площі до об'єму [23]

Table 4. Biomass productivity at limiting values of area-to-volume ratio [23]

S/V, м ² /м ³	V/S, л/м ²	Продуктивність, г/(л•добу)
43	23	2
73	13	6

Таблиця 5. Продуктивність фотобіореакторів різних розмірів

Table 5. Productivity of photobioreactors of different sizes

Фотобіореактор	Розмір, м	Об'єм, л	Площа, м ²	V/S, л/м ²	Продуктивність біомаси, г/(л•добу)
Відкритий ставок (h=1 м)	100×100×1	10 млн	10 000	1 000	0,2
Відкритий ставок (h=0,1 м)	100×100×0,1	1 млн	10 000	100	0,55
Відкритий ставок (h=0,01 м)	100×100×0,01	100 тис.	10 000	10	6
Вертикальний плоскостанельний, освітлення з обох сторін (h=0,01 м)	100×100×0,01	100 тис.	20 000	5	10

Таблиця 6. Вихідні дані та розрахунок балансу основних елементів для вирощування МВ на дигестаті біогазових установок

Table 6. Initial data and calculation of the balance of basic elements for growing microalgae in digestate of biogas plants

Показник	Одиниця виміру	Значення
Баланс вуглецю		
Потреба на 1 кг сух. вироблених мікроводоростей [20]	г CO ₂ /г МВ	1,8
Співвідношення C/CO ₂ = 12/44		0,27
Кількість вуглецю в 1,8 г CO ₂	г	0,49
Вміст вуглецю в мікроводоростях (30–50 % сухої маси)	г С/г сух. МВ	0,4
Ефективність засвоєння вуглецю CO ₂ мікроводоростями	%	81
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача CO ₂	г CO ₂ /(л•добу)	9
Планова подача С	г С/(л•добу)	9,00
Густина CO ₂ при 1 атм і 0 °С	г/л	1,977
Розчинність CO ₂ при атмосферному тиску і 20 °С	мл/100 мл Н ₂ О	87,70
Частка розчинного CO ₂ від максимально необхідного	%	19,3
Вміст гумінових кислот в РФД [22]	%	0,2
Вміст фульвокислот в РФД [22]	%	0,07
Вміст орг. вуглецю в дигестаті [22]	%	2
Кількість органічного вуглецю в рідкій фракції [22]	%	0,17
Кількість органічного С в рідкій фракції, що перейде в МВ	г С/л дигестату	1,39
Вміст азоту в РФД [22]	%	0,66
Вміст фосфору в РФД [22]	%	0,19
Вміст калію в РФД [22]	%	0,62
Частка органічного С в рідкій фракції від необхідного	%	15,4
Баланс азоту		
Потреба N на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г N/г сух. МВ	0,07
Вміст N в мікроводоростях (4–9 % сухої маси)	г N/г сух. МВ	0,06
Ефективність споживання азоту МВ, %	%	86
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача N	г N/(л•добу)	0,35
Кількість загального N в 1 л рідкої фракції дигестату	г N/ л РФД	6,6
Необхідний розчин дигестату з водою (по N)	%	5
Баланс фосфору		
Потреба Р на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г Р/г сух. МВ	0,01
Вміст Р в мікроводоростях (1–3 % сухої маси) [20]	г Р/г сух. МВ	0,01
Ефективність споживання фосфору МВ, %	%	100
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача Р	г Р/(л•добу)	0,05
Кількість загального Р в 1 л рідкої фракції дигестату	г Р/ л РФД	1,9
Необхідний розчин дигестату з водою (по Р)	%	2,6

Баланс калію		
Потреба К на 1 кг сух. вироблених МВ [20]	г К/г сух. МВ	0,015
Вміст К в міководоростях (1,1–2,4 % сухої маси) [20]	г К/г сух. МВ	0,015
Ефективність споживання калію МВ, %	%	100
Планова продуктивність МВ	г/(л•добу)	5
Планова подача К	г К/(л•добу)	0,075
Кількість загального К в 1 л рідкої фракції дигестату	г К/л РФД	6,2
Необхідний розчин дигестату з водою (по К)	%	1,2

тоавтотрофний спосіб культивування МВ. Штучне додання субстратів з високим вмістом органічного вуглецю, як то глюкоза, в даній роботі не розглядається з економічних міркувань.

В таблиці 6 наведено результати оцінки потреби процесу фотоавтотрофного культивування МВ в основних елементах та узагальнений розрахунок балансу основних елементів для підготовки рідкої фракції дигестату для культивування МВ.

З наведених вище розрахунків можна зробити висновки наступні основні висновки:

- до 19% необхідного CO_2 можливо підвести через розчинення у культуральному середовищі, і до 81% - через барботування;
- 5% розчин рідкої фракції дигестату (95% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного надходження N для збору 5 г/(л•добу) міководоростей;
- 2,6% розчин рідкої фракції дигестату (97,4% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного запасу P для збору 5 г/(л•добу) міководоростей;
- 1,2% розчин рідкої фракції дигестату (98,8% чистої води) необхідний як субстрат для забезпечення необхідного запасу калію для збору 5 г/(л•добу) міководоростей.

Попередня техніко-економічна оцінка вирощування МВ

Виробництво продуктів на основі водоростей, як правило, складається з трьох основних етапів: 1) вирощування біомаси, 2) збір і зневоднення, 3) екстракція біомаси, фракціонування та перетворення. Вирощування біомаси водоростей відбувається у відкритих або закритих фотобіореакторах. З таких типів реакторів виходить досить розбавлений розчин МВ з концентрацією від 0,5-0,75 гСР/л для відкритих ставкових систем до 3-4 гСР/л – для закритих систем. Функція збирання та зневоднення полягає в тому, щоб збільшити концентрацію сухих речовин до 10-25% [29] або навіть

отримати повністю сухий продукт. Для технології виробництва біогазу з МВ етапи 2 та 3 не є обов'язковими, що дозволяє знизити собівартість отримання сировини для біогазу на основі МВ.

У собівартість вирощування МВ можуть входити витрати на електричну та теплову енергію, поживні речовини для росту МВ, витрати на оплату праці. Електрична енергія може споживатись на барботування сумішшю повітря з CO_2 , на перекачування та циркуляцію суспензії МВ в реакторних системах, а також на штучне освітлення. Витрати на теплову енергію можуть виникати для систем в помірному та холодному кліматах, де потрібно підтримувати стабільну температуру в реакторах вище 25°C.

Для запропонованої технології споживання електричної енергії буде пов'язане лише зі штучним освітленням та циркуляцією/перекачуванням суспензії МВ в реакторних системах. Передбачається, що подача CO_2 буде здійснюватись за рахунок тиску газу на виході з систем збагачення біогазу, відтак витрати на барботування сумішшю газів не виникатимуть. Забезпечення тепловою енергією передбачається за рахунок теплоти дигестату, що виходить з біогазових реакторів з температурою 38-42°C. Поживні речовини для МВ будуть подаватись у ФБР у складі самого дигестату. Отже, виробчині витрати на вирощування МВ за запропованою технологією включатимуть витрати на електричну енергію на штучне освітлення та циркуляцію/перекачування суспензії МВ, а також витрати на оплату праці персоналу.

За даними [24], експлуатаційні витрати та споживання енергії знаходяться в діапазоні 0,5-2 €/кгМВ і 0,2-5 кВт•год/кгМВ, для несконцентрованих розчинів МВ і відкритих систем культивування, відповідно. За даними [30], собівартість виробництва біомаси МВ у відкритих ставках площею 5000 акрів становить від 1,35 до 1,8 \$/кгМВ. Для закритих систем експлуатаційні витрати зменшуються до 0,1-0,6 €/кгМВ, а споживання енергії – до 0,1-0,7 кВт•год/кгМВ [24].

З точки зору економічної доцільності вирощування МВ важливим фактором є також ціна на МВ як сировину для виробництва кінцевого продукту. Така ціна залежить від галузі виробництва, собівартості і кінцевого продукту. Як видно з рис. 2, на ринках з високою ціною на МВ існує менший попит, що не дозволяє масштабувати масове виробництво МВ. Найбільшим перспективним ринком МВ як сировини є енергетика. При цьому, з МВ можна виробляти як рідкі біопалива, як правило біодизель, так і газоподібні бопалива, як то біогаз. За даними Міністерства енергетики США [24], ціна на МВ на рівні 0,49 \$/кг може забезпечити економічно ефективне виробництво рідкого біопалива з них. Поточний стан та перспективи виробництва дизельного біопалива у світі та в Україні, огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах представлені у статтях [25,26,27, 28].

За нашими попередніми оцінками, для плоскочасельного ФБР об'ємом 100 тис. л і продуктивністю 5 г МВ/(л•добу) орієнтовні витрати та вихід продуктів будуть наступними:

Освітлення: $0,5 \text{ Вт/л} \times 100 \text{ тис. л} = 50 \text{ тис. Вт} = 50 \text{ кВт} \rightarrow$

$\rightarrow 50 \text{ кВт} \times 12 \text{ год/добу} = 600 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу} \rightarrow$

$\rightarrow 600 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу} \times 0,05 \text{ $/кВт} \cdot \text{год} = 30 \text{ $/добу};$

Біомаса: $5 \text{ г/(л} \cdot \text{добу)} \times 100 \text{ тис. л} = 0,5 \text{ млн г/добу} = 500 \text{ кг/добу} \rightarrow$

$\rightarrow 500 \text{ кг/добу} \times 0,2 \text{ $/кг} = 100 \text{ $/добу};$

Біометан: з 0,5 т/добу МВ можна отримати 155 м^3 /добу біометану $\rightarrow$

$\rightarrow 155 \text{ м}^3 \text{ /добу біометану} \times 9,3 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^3 = 1442 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}.$

При ціні біометану 900 \$/1000 м^3 , дохід від біометану отриманого з біомаси мікродоростей складе 140 \$/добу і можна очікувати позитивних економічних показників такої технології. Щоб досягти реального виробництва сучасного біометану з водоростей, цільові

експлуатаційні витрати на вирощування МВ мають становити менше 0,2 євро/кгМВ.

Детальне ТЕО технології буде виконане після підтвердження лабораторним шляхом основних технологічних параметрів процесу.

Анаеробне зброджування мікродоростей як ко субстрату з іншими типами сировини

Біомаса МВ, в залежності від їх виду та умов росту, буде містити різні пропорції макросполук (білків, жирів та вуглеводів), що можуть бути перетворені в додатковий біогаз та, в подальшому, в біометан. При цьому, використання суспензії з вирощеними МВ для виробництва біогазу не потребуватиме обов'язкового концентрування біомаси МВ (відділення МВ від рідини), позаяк волога, що міститься в суспензії, може бути необхідним компонентом у технології анаеробного зброджування поживних решток. Відомо також, що співвідношення С:N в складі органічної речовини МВ є меншим 10, що не є оптимальним для анаеробного зброджування, але дозволить збалансовувати таке співвідношення у поєднанні з поживними рештками з С:N 50-100 до рекомендованого діапазону значень С/N = 15-30.

Так, наприклад, при змішуванні 1 т соломи (СР = 80%, С = 35%, N = 0,5%), що міститиме 200 кг вологи, 800 кг СР, з них 4 кг N, з 8 т суспензії мікродоростей, вирощених на дигестаті (СР = 1%, С = 45%, N = 0,15%), що міститиме 7 920 води, 80 кг СР, з них 12 кг N, можна отримати 9 т субстрату з прийнятною для подачі в анаеробний біореактор вологістю 90,3% та співвідношенням С/N на рівні 20, що знаходиться в межах рекомендованого діапазону (Табл. 7).

Висновки

Мікродорості мають ряд потенційних переваг для застосування їх у виробництві біопалив, але є загальною потребою у розробці та перевірці в промислових умовах технології вирощування МВ на дигестаті врахо-

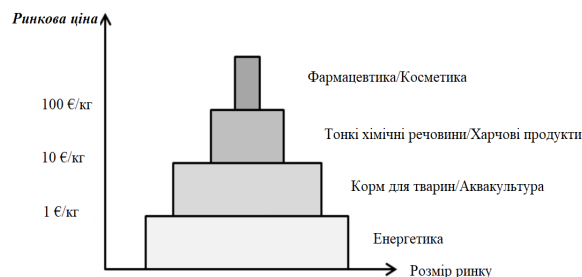


Рис. 2. Ринки та ціни мікродоростей як сировини для виробництва [6]

Fig. 2. Markets and prices of microalgae as raw materials for production [6]

Таблиця 7. Параметри суміші суспензії МВ, вирощених на дигестаті, та соломою

Table 7. Parameters of the mixture of suspension of microalgae grown in digestate and straw

Параметр	Значення для:		
	Соломи	Суспензії мікроводоростей, вирощених на дигестаті	Суміші
СР, %	80	1	9,8
C/N	70	3,0	19,8

вуючи ряд особливостей та ризиків. В результаті аналізу існуючого досвіду, для отримання найвищого приросту біомасу, перспективним є застосування плоскопанельного фотобіореактора. З метою забезпечення оптимальних умов культивування, зменшення каламутності та концентрації аміаку, рідку фракцію доцільно розвести водою у співвідношенні 2-5% РФД та 95-98% води відповідно до розрахованого балансу компонентів. Спільне зброджування мікроводоростей ($C/N < 10$) з поживними рештками (для соломи $C/N > 70$) дозволяє отримати оптимальний субстрат для бродіння ($C/N = 15-30$). Це також зменшує потребу в концентрації мікроводоростей.

При ціні біометану 900 \$/1000 м³ і собівартості МВ менше 0,2 євро/кг, виробництво біометану може стати рентабельним. Найвищу продуктивність біомаси та найнижчі операційні затрати демонструють саме закриті системи плоскопанельних фотобіореакторів і застосовуючи його є реальним досягти мінімальних затрат на виробництво біомаси МВ. Враховуючи очікуване зростання кількості біометанових заводів в Україні, технології вирощування МВ на дигестаті БГУ мають всі передумови для масштабування на національному рівні і дозволять збільшити потенціал виробництва біометану та зменшити викиди ПГ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гелетука Г.Г., Гивель М.М., Кучерук П.П. Можливості виробництва передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок. Частина 1. Теплофізика та теплоенергетика. 2024.
2. Zuliani, Luca & Frison, Nicola & Jelic, Aleksandra & Fatone, Francesco & Bolzonella, David & Ballottari, Matteo. Microalgae Cultivation on Anaerobic Digestate of Municipal Wastewater, Sewage Sludge and Agro-Waste. International Journal of Molecular Sciences. 17.2016.1692. 10.3390/ijms17101692.

3. Moeller, Lucie & Zehnsdorf, Andreas. Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. Energy, Sustainability and Society. 6.2016. 10.1186/s13705-016-0095-7.

4. Hyun-Sik Yun, Young-Saeng Kim, Ho-Sung Yoon. Effect of Different Cultivation Modes (Photoautotrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic) on the Growth of Chlorella sp. and Biocompositions. Sec. Bioprocess Engineering Volume 9 - 2021 | <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.774143>

5. Octavio Perez-Garcia, Y. Bashan. Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. Environmental Science, Engineering, Business.2015. https://www.researchgate.net/publication/283489490_Microalgal_Heterotrophic_and_Mixotrophic_Culturing_for_Bio-refining_From_Metabolic_Routes_to_Techno-economics

6. Claudio Fuentes-Grünwald, José Ignacio Gayo-Peláez, Vanessa Ndovela, Eleanor Wood I, Rahul Vijay Kapoore, Carole Anne Llewellyn. Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed. Bioresource Technology 320 (2021) 124349.

7. Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons. Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. Biotechnology Progress. Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria

8. Giorgos Markou, Liang Wang, Jianfeng Ye, Adrian Unc. Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: Contamination risks and biomass safety concerns. Biotechnol Adv. 2018 Apr 17;36(4):1238–1254. doi: 10.1016/j.biotechadv. 2018.04.003

9. Kashif Rasool, Sabir Hussain, Asif Shahzad, Waheed Miran, Khaled A. Mahmoud, Nisar Ali, Fares Almomani. Comprehensive insights into sustainable conversion of agricultural and food waste into microbial protein for animal feed production. Rev Environ Sci Biotechnol (2023) 22:527–562. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09651-6>

10. Jerry D Murphy, Bernhard Drosch, Eoin Allen, Jacqueline Jerney, Ao Xia, Christiane Herrmann. A perspective on algal biogas. IEA Bioenergy.2015. URL: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/AD_of_Algae_ebook_end.pdf
11. Monique Ras, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2013, 12 (2), pp. 153-164. <https://inria.hal.science/hal-00852286/document>
12. Kumar Gaurav, Krishna Neeti, Reena Singh. Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. Green Technologies and Sustainability. Vo.2, Issue 1, January 2024, 100060. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000532?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b9cb2cdd8377bc
13. Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons. Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. Biotechnology Progress. Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
14. Giovanna Salbitani, Simona Carfagna. Ammonium Utilization in Microalgae: A Sustainable Method for Wastewater Treatment. Sustainability 2021, Vol. 13(2), P.956; <https://doi.org/10.3390/su13020956>
15. Álvaro Torres, Fernando G. Feroso, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja and David Jeison. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. Biodegradation - Engineering and Technology. 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
16. Kamrul Hasan Chowdury, Nurun Nahar, Ujjwal Kumar Deb. The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering. Vol.9 No.4, October 2020. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=103862>
17. C. Kandasamy, Marcos A , Mikihide Demura, Nakajima. The Effects of Total Dissolved Carbon Dioxide on the Growth Rate, Biochemical Composition, and Biomass Productivity of Nonaxenic Microalgal Polyculture Sustainability 2021, 13(4), 2267; <https://doi.org/10.3390/su13042267>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2267>
18. Mohseni, A., Fan, L., & Roddick, F. A. (2021). Impact of microalgae species and solution salinity on algal treatment of wastewater reverse osmosis concentrate. Chemosphere, 285, 131487. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131487
19. Styliani E. Biliari, Ioannis D. Manariotis. (2021) Sodium chloride and nitrogen effects on Chlorella vulgaris growth and biocommodities production. Desalination and Water Treatment, 237, doi:10.5004/dwt
20. Marcia Morales, León Sánchez, Sergio Revah. The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. FEMS Microbiology Letters, Volume 365, Issue 3, 2018 <https://academic.oup.com/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>
21. Biomethane Industrial Partnership.Task Force 5. Innovative technologies for biomethane production. 2023. https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/12/BIP_Task-Force-5_Innovative-technologies_Dec2023.pdf
22. Богдан Малиновський. Як у біогазових установках добриво виробляють.Головний журнал з питань агробізнесу.2020. <https://propozitsiya.com/ua/yak-u-biogazovyh-ustanovkah-dobryvo-vyroblyayut>
23. Clemens Posten. Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. Engineering in Life Sciences.Vol 9. Issue3.2009. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/16182863>
24. F.Fasaei, J.H. Bitter, P.M. Slegers, A.J.B. van Boxtel. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. Volume 31, April 2018, Pages 347-362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417306677>
25. Драгнев С.В., Железна Т.А. Аналіз сировинної та технологічної бази для виробництва дизельного біопалива в Україні // Теплофізика та Теплоенергетика, – 2024, т. 46 № 3, с. 103-112. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.11>, <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/599/521>
26. Железна Т.А., Драгнев С.В. Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного сектору // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024, т. 46, № 4, с. 82-90. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>
27. Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз напрямків оптимізації логістики постачання біопалив на енергетичні об'єкти. Теплофізика та теплоенергетика. 2024, т. 46, № 1, с. 66-75. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/571>
28. Траклер І.С., Потанова М.В. Огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах України та Європи // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024, т. 46, № 4, с. 91-100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>

29. *A.I. Barros, et al.* Harvesting techniques applied to microalgae: a review *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 41 (2015), pp. 1489-1500.
30. *U.S. Department of Energy.* Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan. Washington D.C, 2016 http://energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/mypp_beto_march2016_2.pdf
31. *Золотарьова О.К., Шнюкова Є.І., Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф.* Перспективи використання мікро-водоростей у біотехнології. К. Альтерпрес. 2008. 234с. https://www.botany.kiev.ua/doc/zolot_monog_2008.pdf
32. *Lieve M. L. Laurens.* State of Technology Review–Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. 2017. IEA Bioenergy Task 39. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>
33. *Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez.* Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts (Enhanced Edition) From Feedstock Cultivation to End-Products. United Kingdom: Elsevier Science, 2017. P. 540

OPPORTUNITIES OF ADVANCED BIOMETHANE PRODUCTION FROM MICROALGAE GROWN ON BIOGAS PLANT DIGESTATE. Part 2.

Geletukha H.G.¹, Hyvel M.M.², Kucheruk P.P.³
Sydorenko M.R.⁴

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

LLC"SEC"Biomass"03067, street Maria Kapnist, 2A, Kyiv, 03057, Ukraine

¹*Dr. of science, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057 geletukha@uabio.org, <https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>*

²*Master's degree, LLC"SEC"Biomass"03067, street Maria Kapnist, 2A, Kyiv, 03057, Ukraine, consultant, hyvel@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8740-714X>*

³*PhD Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, senior researcher, kucheruk@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>*

⁴*Bachelor's degree, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, leading engineer, sydorenko@secbiomass.com, <https://orcid.org/0009-0002-0006-6504>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.7>

The aim of the work is to continue the review given in part 1 of the article and to provide a more complete analysis of technologies and equipment for growing microalgae (MA), technical and economic indicators of the technology of cultivating microalgae in biogas plants with additional biomethane yield and utilization of the liquid fraction of digestate.

The design features of flat-panel photobioreactors and their influence on the productivity of growing MA are considered. It is shown that to achieve the productivity of growing MA at the level of 5 g/(L·day) the ratio of the volume of the photobioreactor to its area should not exceed 10-12 L/m². The physiological strategies for cultivating MA are considered and it is shown that their cultivation at biomethane plants, using CO₂ from biogas upgrading and the liquid fraction of digestate, is appropriate in photoautotrophic and, partially, mixotrophic modes. Based on a literature review, the optimal conditions for growing microalgae

in a photoautotrophic mode are shown. A preliminary assessment of the mass balance of CO₂ and nutrients for growing microalgae on the digestate of biogas plants is performed. It is shown that to ensure the productivity of MA cultivation at the level of 5 g/(L·day), the liquid fraction of the digestate of a typical composition will be advisable to dilute with water in a ratio of 2-5% digestate and 95-98% water. This will ensure a sufficient amount of nutrients in the MA growth medium, as well as minimize the impact of turbidity and high ammonia concentrations what are present in the digestate.

The work provides an estimate of the required mass ratio of the MA and straw, at which the optimal C/N ratio for anaerobic fermentation is achieved at 19.8 and the dry matter content in the input mixture of substrates at 9.8%. When mixing MA with straw for further production of biogas from them, there is no need to concentrate microalgae.

Data on the cost of microalgae grown in open and closed systems are presented, as well as possible markets for MA and prices for MA in these markets. It is shown that closed types of photobioreactors should allow for a lower MA production cost and have lower energy requirements. A preliminary estimate of MA production cost in a flat-panel photobioreactor with a volume of 100 thousand L and a productivity of 5 g/(L·day) is presented. It is shown that with an estimated cost of MA cultivation of 0.26 \$/kg and a price for biomethane from MA of 900 \$/1000 m³, a positive economic effect can be expected with a profitability of 0.02 \$/kg MA. However, for the cost-effective production of advanced biomethane from microalgae, the cost of their cultivation should be less than 0.2 euros/kg of dry matter of MA.

Considering the expected increase in the number of biomethane plants in Ukraine due to the opening of exports to EU countries, the technology of growing microalgae on the digestate of biogas plants has all the prerequisites for scaling up at the national level, which will allow increasing the potential for biomethane production and reducing greenhouse gas emissions.

References 33, tables 7, figures 2.

Key words: biogas, advanced biomethane, microalgae, digestate purification, production of third generation biofuels.

1. Geletukha G.G., Hyvel M.M., Kucheruk P.P. Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. Thermal physics and thermal energy. 2024.

2. *Zuliani, Luca & Frison, Nicola & Jelic, Aleksandra & Fatone, Francesco & Bolzonella, David & Ballottari, Matteo.* Microalgae Cultivation on Anaerobic Digestate of Municipal Wastewater, Sewage Sludge and Agro-Waste. *International Journal of Molecular Sciences.* 17.2016.1692. 10.3390/ijms17101692.
3. *Moeller, Lucie & Zehnsdorf, Andreas.* Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. *Energy, Sustainability and Society.* 6.2016. 10.1186/s13705-016-0095-7.
4. *Hyun-Sik Yun, Young-Saeng Kim, Ho-Sung Yoon.* Effect of Different Cultivation Modes (Photoautotrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic) on the Growth of *Chlorella* sp. and Biocompositions. *Sec. Bioprocess Engineering Volume 9 - 2021* | <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.774143>
5. *Octavio Perez-Garcia, Y. Bashan.* Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. *Environmental Science, Engineering, Business.*2015. https://www.researchgate.net/publication/283489490_Microalgal_Heterotrophic_and_Mixotrophic_Culturing_for_Bio-refining_From_Metabolic_Routes_to_Techno-economics
6. *Claudio Fuentes-Grünwald, José Ignacio Gayo-Peláez, Vanessa Ndovala, Eleanor Wood I, Rahul Vijay Kapoor, Carole Anne Llewellyn.* Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed. *Bioresource Technology* 320 (2021) 124349.
7. *Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons.* Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology Progress.*Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
8. *Giorgos Markou, Liang Wang, Jianfeng Ye, Adrian Unc.* Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: Contamination risks and biomass safety concerns. *Biotechnol Adv.* 2018 Apr 17;36(4):1238–1254. doi: 10.1016/j.biotechadv. 2018.04.003
9. *Kashif Rasool, Sabir Hussain, Asif Shahzad, Waheed Miran, Khaled A. Mahmoud, Nisar Ali, Fares Almomani.* Comprehensive insights into sustainable conversion of agricultural and food waste into microbial protein for animal feed production. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2023) 22:527–562. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09651-6>
10. *Jerry D Murphy, Bernhard Drosch, Eoin Allen, Jacqueline Jerney, Ao Xia, Christiane Herrmann.* A perspective on algal biogas. *IEA Bioenergy.*2015. URL: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/AD_of_Algae_ebook_end.pdf
11. *Monique Ras, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard.* Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology,* 2013, 12 (2), pp. 153-164. <https://inria.hal.science/hal-00852286/document>
12. *Kumar Gaurav, Krishna Neeti, Reena Singh.* Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. *Green Technologies and Sustainability.*Vo.2, Issue 1, January 2024, 100060. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000532?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b9cb2cddde8377bc
13. *Tylor J. Johnson, Sarmila Katuwal, Gary A. Anderson, Liping Gu, Ruanbao Zhou, William R. Gibbons.* Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology Progress.*Vol.34(4). 2018. https://www.researchgate.net/publication/323635891_Photobioreactor_Cultivation_Strategies_for_Microalgae_and_Cyanobacteria
14. *Giovanna Salbitani, Simona Carfagna.* Ammonium Utilization in Microalgae: A Sustainable Method for Wastewater Treatment. *Sustainability* 2021, Vol. 13(2), P.956; <https://doi.org/10.3390/su13020956>
15. *Álvaro Torres, Fernando G. Fermoso, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja and David Jeison.* Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. *Biodegradation - Engineering and Technology.* 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
16. *Kamrul Hasan Chowdury, Nurun Nahar, Ujjwal Kumar Deb.* The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering.*Vol.9 No.4, October 2020. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=103862>
17. *C. Kandasamy, Marcos A , Mikihide Demura, Nakajima.* The Effects of Total Dissolved Carbon Dioxide on the Growth Rate, Biochemical Composition, and Biomass Productivity of Nonaxenic Microalgal Polyculture *Sustainability* 2021, 13(4), 2267; <https://doi.org/10.3390/su13042267>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2267>
18. *Mohseni, A., Fan, L., & Roddick, F.A.* (2021). Impact of microalgae species and solution salinity on algal treatment of wastewater reverse osmosis concentrate. *Chemosphere,* 285, 131487. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.13148

19. *Styliani E. Biliani, Ioannis D. Manariotis.* (2021) Sodium chloride and nitrogen effects on *Chlorella vulgaris* growth and biocommodities production. *Desalination and Water Treatment*, 237, doi:10.5004/dwt
20. *Marcia Morales, León Sánchez, Sergio Revah.* The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. *FEMS Microbiology Letters*, Volume 365, Issue 3, 2018 <https://academic.oup.com/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>
21. *Biomethane Industrial Partnership.* Task Force 5. Innovative technologies for biomethane production. 2023. https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/12/BIP_Task-Force-5_Innovative-technologies_Dec2023.pdf
22. *Bohdan Malinovskyi.* Yak y biogazovuh ustanovkax dobruvo vurobliaut. [How fertilizer is produced in biogas plants].The main magazine on agribusiness issues 2020. <https://propozitsiya.com/ua/yak-u-biogazovyh-ustanovkah-dobryvo-vyroblayaut>
23. *Clemens Posten.* Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*. Vol 9. Issue3.2009. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/16182863>
24. *F.Fasaei, J.H. Bitter, P.M. Slegers, A.J.B. van Boxtel.* Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. Volume 31, April 2018, Pages 347-362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417306677>
25. *Dragnev S.V., Zhelezna T.A.* Analiz surovunnoi ta technologichnoi bazu dlia vurobnutstva dizelnogo biopaluva v Ukraini [Analysis of the raw material and technological base for the production of diesel biofuel in Ukraine] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*, – 2024, vol. 46, No. 3, pp. 103-112. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.11>, <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/599/521>
26. *Zhelezna T.A., Dragnev S.V.* Rol ridkuh biopaluv y decarbonizacii transportnogo sektory. [The role of liquid biofuels in the decarbonization of the transport sector] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*. – 2024, vol. 46, No. 4, pp. 82-90. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>
27. *Zhelezna T.A., Dragnev S.V.* Analys napryamkiv optimizacii logistiku postachannia biopaluv na energetichni obektu. [Analysis of directions for optimizing the logistics of biofuel supply to energy facilities]. *Thermal Physics and Heat Power Engineering*. 2024, vol. 46, no. 1, p. 66- 75. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/571>
28. *Traksler I.S., Potapova M.V.* Oglyad technology transformacii zelenogo vodnyu dlya pidvuschennya vurobnuctva biometany na diyuchuh zavodah Ukrainu ta Europy. [Review of green hydrogen transformation technologies to increase biomethane production at operating plants in Ukraine and Europe] // *Thermal Physics and Thermal Power Engineering*. – 2024, vol. 46, No. 4, pp. 91-100. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.10>
29. *A.I. Barros, et al.* Harvesting techniques applied to microalgae: a review *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 41 (2015), pp. 1489-1500.
30. *U.S. Department of Energy.* Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan. Washington D.C, 2016 http://energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/mypp_beto_march2016_2.pdf
31. *Zolotaryova O.K., Shnyukova E.I., Sivash O.O., Mykhaylenko N.F.* Perspektyvy vukoristannya microvodorotey y biotechnologii. [Prospects for the use of microalgae in biotechnology] B. Alterpress. 2008. 234p. https://www.botany.kiev.ua/doc/zolot_monog_2008.pdf
32. *Lieve M. L. Laurens.* State of Technology Review–Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. 2017. IEA Bioenergy Task 39. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>
33. *Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez.* *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* (Enhanced Edition) From Feedstock Cultivation to End-Products. United Kingdom: Elsevier Science, 2017. P. 540

Отримано 11.12.2025

Received 11.12.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025

УДК 628.1

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВОДОПІДГОТОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Целень Б.Я.² к.т.н., Саблій Л.А.³ д.т.н., Радченко Н.Л.⁴, к.т.н.,
Недбайло А.Є.⁵ к.т.н.

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., e-mail: tdsittf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, професор кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології, e-mail: larisasabliy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4217-3535>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.8>

В статті представлено огляд сучасних технологій підготовки води для підприємств теплоенергетики. На основі проведеного аналізу запропоновано ряд установок, розроблених в ІТТФ НАН України, які є ефективними при підготовці води, зокрема для живлення котлоагрегатів. В основу їх роботи закладений принцип дискретно-імпульсного введення енергії, застосування якого дозволяє інтенсифікувати тепломасообмінні і хімічні реакції. Запропоноване обладнання відповідає критеріям ефективності, енергоощадності та екологічності, так як не вимагає застосування хімічних реагентів.

This article presents an overview of water treatment technologies for powering industrial enterprises. Based on the analyzed information proposed the equipment has developed at the Institute of Engineering Thermophysics of National academy of sciences of Ukraine, which is effective at the treatment of water for powering industrial enterprises. This equipment based on the principle of discrete-pulse energy input, which allows intensifying heat and mass transfer reactions, as well as chemical. Therefore, the proposed equipment corresponds to the criteria of energy efficiency and ecological safety.

Бібл. 15, рис. 3.

Ключові слова: водопідготовка, кавітація, дискретно-імпульсне введення енергії, теплоенергетика.

Постановка проблеми. Запорукою надійної і ефективної роботи обладнання підприємств теплоенергетики є використання сучасних підходів і технологій водопідготовки. Це пов'язане з тим, що галузь є одним з основних споживачів води. Обсяги її використання сягають 25% від загальних витрат води усіх промислових підприємств [1]. Для підприємств теплоенергетики якість води є надзвичайно важливою, так як вона присутня на всіх технологічних стадіях і може використовуватись для підживлення, продувки, промивання, підтримання концентрації хімічних речовин, конденсації відпрацьованої пари, як теплоносії тощо. Тому питання якості підготовки води стає одним з першочергових.

В рамках даної роботи увага зосереджена на підготовці води для підживлення систем водопоста-

чання підприємств теплоенергетики. Основною вимогою до такої води є її демінералізація та дегазація, так як вона не повинна містити солей жорсткості, заліза та розчинених газів, таких як кисень і діоксид вуглецю. Присутність будь-якого з цих компонентів може створювати негативний вплив. Так, наприклад, присутність солей жорсткості у воді може викликати відкладення осаду на поверхнях нагріву, зниження теплопередачі та підвищення енергоспоживання. Розчинений діоксид вуглецю утворює вугільну кислоту, яка знижує рН води, провокуючи початок корозійних процесів, які з часом призводять до руйнування поверхонь металу, зупинки обладнання та необхідності його ремонту. Присутність заліза може каталізувати корозійні процеси. Окиснене у воді залізо утворює осади, які можуть блокувати трубопроводи та фільтри, знижуючи ефективність облад-

нання і підвищуючи витрати на його обслуговування. Тому вибір обладнання на кожній стадії водопідготовки вимагає дотримання не лише базових нормативних вимог, але й врахування специфічних (рН, жорсткість, лужність, солевміст та ін.), які залежать від початкового складу води. Складність також полягає в економічному обґрунтуванні комбінованих систем очищення води, що дозволяють знизити витрати на їх використання без втрати якості підготовленої води. Іншою проблемою є довгострокова стабільність і ефективність застосовуваних технологій, оскільки в процесі експлуатації можуть виникати проблеми з забрудненням фільтрувальних елементів, зниженням їхньої пропускної здатності або високими витратами на утилізацію відходів. Крім огляду існуючих технологій, дана стаття ставить за мету аналіз їхніх недоліків та пропозицію щодо шляхів удосконалення процесів підготовки води з врахуванням новітніх розробок у цій галузі. Важливим аспектом є дослідження можливості інтеграції різних методів очищення для забезпечення максимального ефекту при мінімальних витратах.

Огляд технологій підготовки води для підживлення теплоенергетичного обладнання.

Технології вилучення заліза. Присутність у воді заліза є однією з найпоширеніших проблем у водопідготовці. Залізо може бути одночасно присутнім у воді в нерозчинному вигляді (елементарне) і в розчинному - у вигляді двовалентного (Fe^{2+}), тривалентного (Fe^{3+}) чи в складі органічних речовин. Тому для його ефективного вилучення використовують комбінації різних методів. Згідно даних [2], традиційною вважається комбінація технологій окислення (киснем повітря або аерацією, хлором, озоном, перекисом водню тощо) з наступним осадженням хімічними речовинами-коагулянтами та фільтрацією. Так під час аерації воду спочатку насичують киснем, що спричиняє окислення розчиненого двовалентного заліза (Fe^{2+}) до тривалентного (Fe^{3+}), після чого осаджують з подальшою фільтрацією утворених нерозчинних гідроксидів заліза. Однак, використання цих технологій пов'язане зі значною тривалістю через реакцію окислення та необхідністю резервуарів великих об'ємів. Для прискорення процесу вилучення заліза використовують спеціальні окиснювачі. Найбільш доступним на теперішній час є хлор, так як він не вимагає значних витрат та одночасно вирішує проблему знезараження води. Більш дорогим, але перспективним вважається використання озону. Проте складність обладнання та значні витрати електроенергії обмежують його широке впровадження. Досить поширеною є технологія каталітичного окислення з подаль-

шою фільтрацією. При цьому реакція окислення заліза відбувається на поверхні гранул фільтруючого матеріалу, що виступає каталізатором. Після окислення залізо осідає на поверхні гранул фільтруючого середовища і згодом вимивається при зворотному промиванні. Для інтенсифікації процесу у воду додають додатково різні хімічні окисники. Ефективним для вилучення заліза вважається також використання іонообмінних фільтрів на основі синтетичних смол для заміни іонів заліза на нешкідливі іони, зазвичай натрію. До того ж ці фільтри дозволяють видаляти інші небажані іони, такі як кальцій і магній. Вони не утворюють тверді відкладення, що спрощує обслуговування, однак потребують регулярної регенерації смол та можуть підвищувати вміст натрію у воді, що є обмежуючим фактором. Згідно [3], відомо про ефективність технології біологічного видалення заліза, яка передбачає залучення мікроорганізмів, котрі здатні окислювати залізо, перетворюючи його на нерозчинні форми, які потім видаляються фільтрацією. На думку авторів, перевагою є ефективність і екологічність технології, оскільки вона не потребує використання хімічних реагентів. Проте існує складність контролю за умовами для підтримки життєдіяльності мікроорганізмів, яка ускладнюється довго тривалістю процесу порівняно з хімічними методами. Високою ефективністю вирізняються мембранні технології, до яких відносять ультрафільтрацію та зворотний осмос. Вони застосовуються для видалення заліза з води та здатні видаляти колоїдні та органічно зв'язані форми. Проте їх основний недолік пов'язаний з необхідністю значних капіталовкладень та високим енергоспоживанням. Також існує потреба регулярного очищення та заміни мембран. Отже, вибір оптимальної технології видалення заліза залежить від його концентрації у воді, хімічного складу, обсягу споживання та економічних міркувань. Комбінація різних методів може забезпечити найкращі результати з урахуванням специфічних умов експлуатації.

Технології вилучення солей жорсткості. За даними [4], на сьогоднішній день іонообмінні технології є одними з найефективніших для зниження жорсткості води оскільки дозволяють видаляти до 99% іонів кальцію та магнію. Їх основне завдання полягає у заміні іонів кальцію та магнію на іони натрію. Це досягається за допомогою іонообмінних синтетичних смол. Однак, їх основними недоліками є необхідність застосування агресивних хімічних реагентів (сірчаної кислоти, вапна тощо), потреба у системній регенерації смол та утворення регенераційних розчинів, які негативно впливають на навколишнє середовище та

потребують нейтралізації. Крім того, виникає небезпека підвищеного вмісту натрію у воді, який є небезпечним для промислових процесів. До цього додається необхідність постійного контролю параметрів процесу та їх коригування. Останні дослідження та сучасні розробки спрямовані головним чином на удосконалення іонообмінних матеріалів та технологій для підвищення їх ефективності та зменшення екологічного впливу. Наприклад, використання цеолітових монолітів показало перспективні результати у підвищенні продуктивності процесу. На сьогодні іонообмінні технології є основним засобом зниження жорсткості води у теплоенергетиці, проте їх застосування потребує ще й врахування економічних та екологічних аспектів. Ефективним [4] вважається поєднання одно- або двоступеневої схеми зворотного осмосу з На-катіонуванням, що дозволяє досягти зниження жорсткості води, її лужності і загального солемісту. До екологічно безпечних відносяться баромембранні методи, які побудовані на пропусканні води під тиском через напівпроникні мембрани. На сьогодні до інноваційних економічно ефективних технологій відносять ультрафільтрацію, зворотноосмотичну демінералізацію, електродеіонізацію, технологію підготовки води, що включає попередню фільтрацію. Новизна останньої, за даними [5], полягає у використанні технології вихрового вакуумного сканера з щітковими форсунками для високоефективної очистки фільтруючого елемента. При цьому вирішується питання скорочення витрат води на промивання. Стадія ультрафільтрації використовується для вилучення колоїдних домішок, частинок органічних забруднень, бактерій і мікроорганізмів. Ультрафільтрація є аналогом коагуляції, проте позбавлена недоліків, властивих традиційним технологіям. Зокрема, немає необхідності контролю параметрів ведення процесу (рН, температури, часу) порівняно з освітлювачами, є можливість скорочення виробничих площ, простота експлуатації. Однак виникає потреба періодичного кислотного та лужного промивання модулів. Технологія електродеіонізації використовується для фінішної демінералізації води. Вона є аналогом фільтрів змішаної дії, однак регенерацію фільтрів проводять в процесі очищення за рахунок проходження через шар завантаження електричного струму.

Технології вилучення розчинених газів. Ефективне вилучення розчинених газів найчастіше потребує поєднання кількох методів залежно від умов експлуатації та економічної доцільності. Традиційною і ефективною вважається [6] технологія вилучення розчинених газів з води з використанням декарбонізаторів. Процес базується на вилученні розчиненого газу при його

контакті з повітрям. Однак, разом з цим, він є одним з найскладніших масообмінних процесів для підготовки води в теплоенергетиці, бо його перебіг пов'язаний зі значною кількістю взаємозалежних факторів, котрі здатні змінюватись в широкому діапазоні. Як, наприклад, залежність розчинності газу від температури, яка в процесі декарбонізації змінюється. Згідно даних [7] конструктивно декарбонізатори поділяють на протитечійні та прямоточні. Перші найчастіше є апаратами з насадкою, наприклад, з керамічними кільцями Рашига, при цьому потік повітря подається вентилятором знизу. Їх основним недоліком є великі габарити, складність в обслуговуванні та висока вартість. Як прямоточні декарбонізатори застосовують ежекційні апарати, зокрема, водоструминні ежектори і прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати. Використання водоструминних ежекторів як декарбонізаторів обмежене початковою концентрацією газу (до 20 мг/кг). Відомі також багатоступеневі ежектори з коефіцієнтом ежекції від 20 до 30, принцип дії яких побудований на ежекції струмини води по мірі її руху від одного ступеня до іншого. Прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати можуть бути в різному конструктивному виконанні, а коефіцієнт ежекції може досягати 1000. Можливість застосування модульного підходу дозволяє збільшити продуктивність до сотень м³/год, проте при цьому зростають габарити і маса. Загальним недоліком усіх типів декарбонізаторів є необхідність індивідуального розрахунку з врахуванням початкових умов внаслідок фактичної неповторюваності вихідних даних. Через ці недоліки їх використання намагаються уникати. Для видалення з води розчинених газів широкого розповсюдження набули технології деаерації. Серед найпростіших – технологія теплової деаерації, яка передбачає нагрівання води до температури кипіння під тиском, що знижує розчинність газів, після чого відбувається їх видалення. Цей процес ефективний, проте через високі енергетичні витрати та потребу у спеціальному обладнанні вимагає пошуку альтернативних шляхів дегазації. Технологія вакуумної деаерації теж вважається [8] ефективною, однак розрахована для роботи при низьких температурах та передбачає створення вакууму для зниження тиску в системі, що сприяє вивільненню розчинених газів. Метод ефективний для систем з невеликим обсягом води. Високу ефективність при низьких енергетичних витратах показали технології мембранної деаерації [9]. Однак на сьогодні проблемою залишається висока вартість обладнання та необхідність регулярного очищення мембран. Поєднання деаерації з хімічними методами дозволяє досягти більш ефектив-

ного зниження концентрації кисню і діоксиду вуглецю у воді. Ефективним реагентом є гідразин (N_2H_4), який реагує з киснем, утворюючи азот і воду, що запобігає корозії, проте він токсичний. Застосовується також сульфід натрію (Na_2SO_3), який утворює з ним нешкідливі сполуки, проте потребує точного дозування.

Сучасною альтернативою та ефективними методами фізичної дегазації вважаються [10] акустичні методи з використанням високочастотних ультразвукових генераторів. Їх перевага полягає у швидкому і ефективному вилученні з води розчинених газів. Процес відбувається внаслідок того, що значна частина розчиненого газу під впливом ультразвукових коливань переходить всередину бульбашок, які в подальшому зливаються і виходять з води через поверхню поділу фаз. Перевагою акустичних методів є можливість вилучення з води не лише діоксиду вуглецю та кисню, але й інших газів. Однак, в промислових умовах ці методи не знаходять широкого впровадження через значні питомі енергетичні витрати.

Протягом останніх років все більше уваги з боку науковців та спеціалістів [11-14] приділяється можливості і перевагам застосування гідродинамічної кавітації для дегазації води. Численні лабораторні та аналітичні дослідження і впровадження отриманих результатів у різних областях виробництва довели, що гідродинамічну кавітацію слід розглядати як вагому альтернативу акустичній кавітації як з погляду продуктивності, так і з погляду проблеми енергозбереження. Відомо, що для підвищення ефективності роботи деаераторів їх додатково обладнують кавітаційними пристроями. Найчастіше вони є соплами змінного діаметра і довжини. Внаслідок збільшення швидкості потік турбулізується, а при зниженні тиску утворюються кавітаційні парогазові бульбашки. Довжина кавітаційного пристрою залежить від умов забезпечення розвитку кавітаційних бульбашок. У пристрої потік перебуває у вигляді двофазної пароводяної суміші, яка на виході з нього, потрапляючи в деаератор, внаслідок перегріву закипає. В деаераторі за рахунок створюваного кавітаційним пристроєм ефекту дроблення потоку кавітаційними бульбашками забезпечується диспергування води і турбулізація потоку. Створювані за допомогою кавітаційного пристрою ефекти дозволяють інтенсифікувати процес та досягати більш глибокої деаерації води. Отже, їх використання є перспективним завдяки високій ефективності, екологічності та енергозбереженню. Крім цього, за даними досліджень Федоткіна І.М., Немчишина А.Ф., Комарова А.А., Вітенько Т.М., Sun H. [15-18], метод гідродинамічної

кавітації дозволяє створювати ефект знезараження води, впливати на структуру, активуючи її, та змінювати фізико-хімічні властивості. Одночасно з цим, важливим є вибір оптимальних режимів ведення процесу та конструктивне виконання кавітатора.

В ІТТФ НАН України в межах започаткованого напрямку дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) в гетерогенні середовища проводяться дослідження підготовки води для різних галузей, зокрема, теплоенергетики. В роботах [19] досліджено можливість підвищення ефективності видалення гідрокарбонату кальцію та зниження жорсткості води за допомогою дискретного імпульсного введення енергії. У дослідженнях [20] доведено ефективність вилучення заліза з води. У роботах [21-23] вивчено особливості перебігу процесу вилучення розчинених газів методом гідродинамічної кавітації не лише з води, але й з кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Особливість ведення процесу кавітаційної дегазації полягає у створенні умов для інтенсивного зростання парогазових бульбашок з наступним їх вилученням з рідини, уникаючи їхнього колапсу на другій стадії процесу кавітації.

В рамках продовження даного напрямку розроблено дослідну (рис. 1) та на її основі дослідно-промислову (рис. 2) аераційно-окиснювальні установки роторного типу (АОРТ) для вилучення з води заліза продуктивністю 20-40 м³/год [24]. Запропоноване обладнання є ефективним для очищення води не лише від іонів заліза, але й для вилучення марганцю, сірководню, діоксиду вуглецю, сульфатів і нітратів. За рахунок можливості регулювання гідродинамічних параметрів процесу та зміни конструктивних особливостей роторно-пульсаційного вузла аератора-окиснювача, можна регулювати динаміку і якість очищення води та коригувати її рН. Обладнання дозволяє інтенсифікувати швидкість тепломасообміну і хімічних реакцій у воді та водних системах на 25-30 %, скоротити тривалість перебігу процесів у 2-3 рази. Такий результат досягається за рахунок спеціальної конструкції робочого органу роторно-пульсаційного апарата (конструкція типу ротор-статор-ротор) та створюваних у ньому гідродинамічних ефектів. Під час обробки вода проходить крізь щільні отвори та зазори роторно-пульсаційного вузла і піддається дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, що призводить до інтенсивного диспергування бульбашок повітря, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти, зазвичай, недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середо-

вищ навіть при значно вищому рівні питомих енерговитрат.

Пропонована дослідно-промислова установка АОРТ є найменш енергозатратним аераційним пристроєм, а її питомі енерговитрати на обробку 1 м³ води на 40 % нижчі, ніж для водоповітряного ежектора і в 2,5 рази нижчі, ніж для вентиляторної градирні. Це пояснюється більш високою швидкістю окиснення іонів Fe²⁺ в установці АОРТ, ніж в порівнюваних пристроях. Її безумовною перевагою є можливість зниження енерговитрат на 30-35 %, собівартості на 20-25 % та підвищення швидкості розчинення кисню в порівнянні з існуючими аераційними пристроями у 2-3 рази. Пропонована дослідно-промислова установка АОРТ пройшла успішні виробничі випробування. В перспективі планується її використання не лише для вилучення з

води заліза, але й для інтенсифікації процесів дегазації, розчинення, перемішування, нагрівання, диспергування, аерації тощо.

Для інтенсифікації вилучення розчинених газів з води і рідких середовищ, зокрема для вилучення вуглекислоти з водного конденсату (з метою його нейтралізації) розроблено дослідно-промислову установку нейтралізації конденсату (УНК) (рис.3) [23, 25]. Її принцип роботи базується на використанні сукупності гідродинамічних кавітаційних ефектів, створюваних за допомогою принципу ДІВЕ та реалізованих в роторно-пульсаційному апараті спеціальної конструкції. Особливість установки в тому, що роторно-пульсаційний апарат працює в контурі рециркуляції з вакуумною камерою дегазації. При цьому роторно-пульсаційний апарат з'єднаний безпосередньо з вакуумною камерою, в якій



Рис. 1. Дослідна установка АОРТ для вилучення з води заліза: 1 – реактор; 2 – роторно-пульсаційний апарат; 3 – триходовий кран; 4 – контур рециркуляції; 5 – фільтрувальна колона; 6 – розпилювальна головка; 7 – блок управління

Fig. 1. Installation AORT for removal of iron from water: 1 – reactor; 2 – rotary-pulsation apparatus; 3 – three-way crane; 4 – contour of recirculation; 5 – filtration column; 6 – spray head; 7 – control unit



Рис .2. Дослідно-промислова установка АОРТ продуктивністю 20-40 м3/год: 1 – АОРТ; 2 – блок управління; 3 – ємність подачі води на фільтр; 4 – фільтр; 5 – збірник готової продукції

Fig. 2. Pilot industrial installation AORT with a productivity of 20-40 m3/hour: 1 – AORT; 2 – control unit; 3 – water supply tank to the filter; 4 – filter; 5 – tank for finished products



Рис. 3. Дослідна установка нейтралізації конденсату продуктивністю до 450 м³/год
Fig. 3. Installation for neutralization of condensate with a productivity of up to 450 m³/h

за допомогою вакуумного насоса підтримується тиск нижчий за атмосферний з паралельним відведенням вилучених газів.

Комплексний вплив механізмів принципу ДІВЕ дозволяє знижувати поріг кавітації і створювати інтенсивний динамічний вплив на оброблювану рідину. Перевагою дослідно-промислової установки УНК є можливість швидкого і ефективного вилучення розчинених газів без застосування хімічних реагентів і досягнення при цьому ефекту знезараження води. Крім цього, існує можливість впливу на фізико-хімічні показники води, зокрема, електропровідність, окисно-відновний потенціал, водневий показник рН, органолептичні характеристики тощо. Запропоноване обладнання може застосовуватись на підприємствах теплоенергетики для зниження витрат на підготовку води для живлення обладнання та зменшення кількості стічних вод, які можуть потрапляти в навколишнє середовище.

Висновки. Водопідготовка для підживлення обладнання підприємств теплоенергетики є важливим та необхідним фактором. Вибір комплексу енергоефективних методів очищення води і раціональних режимів залежить від її початкового складу (джерела надходження), типу підприємства, обладнання, яке на ньому функціонує, потужності та рівня експлуатації. У роботі наведено критерії оцінювання якості води для теплоенергетичних підприємств та характерні забруднювачі. Представлено класифікацію традиційних і інноваційних технологій і методів підготовки води для підживлення підприємств теплоенергетики. Запропоновано нове енергоефективне обладнання, за допомогою якого можна очищати воду від солей жорсткості, заліза та розчинених газів до їх гранично допустимих концентрацій та нижче

ЛІТЕРАТУРА:

1. Т. С. Айрапетян, І. М. Чуб (2024). Водопідготовка на підприємствах теплоенергетики з використанням Накаціонітових фільтрів: Монографія, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. 151 с.
2. Iron removal the natural states of iron [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/drinking-water-treatment/specifics-water-treatment/Iron-removal> . Дата звернення 15.01.2025 р.
3. Tekerlekopoulou A., Vasiliadou I., Vayenas D. Biological manganese removal from potable water using trickling filter. Biochemical Engineering Journal. 2008. Vol. 38. P. 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.07.016>
4. Veolia Chapter 08- Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange> . Дата звернення 06.01.2025 р.
5. Сучасні технології підготовки води в енергетиці [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mtechnology.com.ua/suchasni-texnologii%dl%97-pidgotovki-vodi-v-energetici/> Дата звернення 08.01.2025 р.
6. High Efficiency, Low Cost Decarbonator [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://heilprocessequipment.com/products/decarbonator?utm_source=chatgpt.com . Дата звернення 10.01.2025 р.
7. Р.В. Пономаренко (2020). Науково-теоретичні основи зниження техногенного навантаження на системи водопостачання регіону з урахуванням основних принципів басейнового управління водними ресурсами: Монографія, Харків. Планета-Прінт. 112 с.

8. Harbold G., Park J. (2008). Single-stage vacuum deaeration technology for achieving low dissolved gas in process water [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gastransfer.com/wp-content/uploads/2023/08/IWC2008.pdf>. Дата звернення 15.01.2025 р.
9. Петренко О., Луговський О. Огляд методів дегазації робочих тіл. Mechanics and advanced technologies. 2023. №7.3 (99). С.301-308 <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.290444>
10. Ivanitsky G., Tselen B., Nedbailo A., Radchenko N., Gozhenko L. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Physics of aerodisperse systems. 2023. № 61. С.227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
11. Sun X, Xuan X, Song W, Jia X, Ji L, Zhao S, et al. Experimental and numerical studies of cavitation in an advanced rotary hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. Ultrasonics Sonochemistry. 2021. 70, 105311 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
12. Dutta N., Kopparthi P., Mukherjee A., Nirmalkar N., Boczkaj G. Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations. Water Research. 2021. 204, 117559 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117559>
13. Гоженко Л., Іваницький Г., Лимарь А., Ободович А., Радченко Н., Сидоренко В., Целень Б. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологіях підготовки води. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1 (sua19-01), 47–62. <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008>
14. J. Haque Chaudhuri, D. Chatterjee. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. Chemical Engineering Science. 2024. 295. 2024, 120167 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>
15. Cerecedo L., Dopazo S, Gomez-Luz R. Water. Disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. Ultrasound technology. 2018. 48, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
16. Вітенько Т., Гащин О. Гідродинамічна кавітація як один із способів активації рідких середовищ. Наукові праці ОНАХТ. 2006. № 28. Т.2, С.20-23
17. Sun, H., Jia, H., Liu, J., Wang, G., Zhao, S., Zi, L. et al. Investigation on the characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. Cleaning technology Sep. 2020. 251(15), 117252. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117252>
18. Целень Б., Ободович О., Недбайло А., Гоженко Л., Радченко Н. Оптимізація процесу водопідготовки для відновлення соків за допомогою гідродинамічної кавітації. Продовольчі ресурси. 2024. Т. 12. №23 С. 189-198 DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22>
19. Obodovych O., Sablii G., Tselen B., Sydorenko V. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. 4/6 (124), PP. 28-34 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286005>
20. Ободович О., Сидоренко В., Целень Б., Шейко Т. Аераційно-окислювальне обладнання для підготовки питної і технологічної води. Продовольчі ресурси. 2023. 11(21), С. 122–132. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12>
21. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25, PP. 215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
22. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers Acta Periodica Technologica. 2022. 53, С. 123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
23. Долінський А., Целень Б., Іваницький Г., Коник А., Радченко Н., Гартвіг А. Застосування способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу Наукові праці. 2017. 81(1), С. 9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v8i1l.663>
24. Ободович О., Сидоренко В., Булій Ю., Степанова О. Очищення стічних вод теплових електростанцій (ТЕС). Теплофізика і теплоенергетика 2023. 45 (2), С. 69-76. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.8>
25. Долінський А., Коник А., Радченко Н., Целень Б., Гоженко Л. Перспективність та напрямок розвитку апаратів принцип роботи яких ґрунтується на механізмах дискретно-імпульсного введення енергії. Теплофізика і теплоенергетика. (2017). 39 (5), С.7-11. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01>

MODERN WATER TREATMENT TECHNOLOGIES FOR THERMAL POWER ENGINEERING

Obodovych O.¹, Tselen B.2, Sabliy L.³, Radchenko N.⁴, Nedbailo A.⁵

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Dr of Sc., Engineering, Head of Department, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Leading researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

³*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Beresteiskyi ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, Dr of Sc., Engineering, Professor of the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Ecobiotechnology, <https://orcid.org/0000-0003-4217-3535>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>*

⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.8>

This article presents an overview of new technologies water treatment for powering industrial enterprises. The main requirement is the absence of hardness salts, iron and dissolved gases. These criteria used for analyze the advantages and disadvantages of traditional and innovative technologies. Among them, membrane technologies compared and evaluated, which include ultrafiltration, reverse osmosis, and ion exchange. In addition, baromembrane methods, electrodeionization, water treatment technology, including prefiltration and, as a significant alternative, acoustic methods using high-frequency ultrasonic generators and hydrodynamic cavitation are considered. Technologies that involving using of various chemical reagents also reviewed. On its basis, using complex processing with involvement of innovative approaches were priority. In this area, we propose devices created at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, which is effective at the treatment of water for powering industrial enterprises. This equipment has based on the principle of discrete-pulse energy input. Its implementation in the proposed equipment

allows intensifying heat and mass transfer reactions, as well as chemical. In particular, using of aeration and oxidation equipment rotor type with a productivity of 20-40 m³/hour compared to other devices allows reducing energy consumption by 15-20 times and intensify the process of preparing water. Additionally, installation for neutralization of condensate with a productivity of up to 450 m³/h, consumes no more than 3.75 kWh of electricity. At the same time almost complete removal dissolved gases from water occurs during the first two minutes of processing. Therefore, the proposed equipment is efficient, energy saving and ecological safety for use in water treatment technologies for powering industrial enterprises.

References 15, figures 3.

Key words: water treatment, hydrodynamic cavitation, discrete-pulse energy input, thermal power engineering.

1. T. S. Airapetian, I. M. Chub (2024). Vodopidhotovka na pidpriemstvakh teploenerhetyky z vykorystanniam Na-kationitovykh filtriv [Water treatment at thermal power companies using Na-cationic filters]. Monohrafiia, Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. 151p. (in Ukr.)

2. Iron removal the natural states of iron [Electronic resource]. Access mode: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/drinking-water-treatment/specifics-water-treatment/Iron-removal>

3. Tekerlekopoulou A., Vasiliadou I., Vayenas D. Biological manganese removal from potable water using trickling filter. Biochemical Engineering Journal. 2008. Vol. 38. pp.292-301. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.07.016>

4. Veolia Chapter 08- Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing [Electronic resource]. Access mode: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange>

5. Suchasni tekhnolohii pidhotovky vody v enerhetytsi [Advanced water treatment technologies in the energy sector] [Electronic resource]. Access mode: <https://mtechnology.com.ua/suchasni-tekhnologi%dl%97-pidgotovki-vodi-v-energetici/> (in Ukr.)

6. High Efficiency, Low Cost Decarbonator [Electronic resource]. Access mode: https://heilprocessequipment.com/products/decarbonator?utm_source=chatgpt.com

7. R.V. Ponomarenko (2020). Naukovo-teoretychni osnovy znyzhennia tekhnohennoho navantazhennia na systemy vodopostachannia rehionu z urakhuvanniam osnovnykh pryntsyviv baseinovoho upravlinnia vodnymi resursamy [Scientific and theoretical foundations for reducing the anthropogenic load on the region's water supply systems, taking into account the basic principles of basin water management]. Monohrafiia, Kharkiv. Planeta-Print. 112p. (in Ukr.)

8. Harbold G., Park J. (2008). Single-stage vacuum deaeration technology for achieving low dissolved gas in process water [Electronic resource]. Access mode: <https://gastransfer.com/wp-content/uploads/2023/08/IWC2008.pdf>

9. Petrenko O., Luhovskyi O. Ohliad metodiv deghazatsii robochykh til [Overview of methods for degassing process liquids]. *Mechanics and advanced technologies*. 2023. No.7.3 (99). pp.301-308 <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.290444> (in Ukr.)
10. Ivanitsky G., Tselen B., Nedbailo A., Radchenko N., Gozhenko L. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. *Physics of aerodisperse systems*. 2023. No. 61. pp.227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
11. Sun X, Xuan X, Song W, Jia X, Ji L, Zhao S, et al. Experimental and numerical studies of cavitation in an advanced rotary hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. 70, 105311 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
12. Dutta N., Kopparthi P., Mukherjee A., Nirmalkar N., Boczkaj G. Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations. *Water Research*. 2021. 204, 117559 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117559>
13. Hozhenko L., Yvanytskyi H., Lyamar A., Obodovych A., Radchenko N., Sydorenko V., Tselen B. Dyskretno-impulsne vvedennia enerhii v tekhnolohiiakh pidhotovky vody [Discrete-pulse energy input in water treatment technologies] *Scientific Environment of Modern Human*. 2021. 1 (sua19-01), pp.47–62. <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008> (in Ukr.)
14. J. Haque Chaudhuri, D. Chatterjee. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*. 2024. 295. 2024, 120167 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>
15. Cerecedo L., Dopazo S, Gomez-Luz R. Water. Disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. *Ultrasound technology*. 2018. 48, pp.71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
16. Vitenko T., Hashchyn O. Hidrodynamichna kavitatsiia yak odyin iz sposobiv aktyvatsii ridkykh seredovyskh [Hydrodynamic cavitation as a method of activating liquids]. *Naukovi pratsi ONAKhT*. 2006. № 28. Vol.2, pp.20-23 (in Ukr.)
17. Sun, H., Jia, H., Liu, J., Wang, G., Zhao, S., Zi, L. et al. Investigation on the characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Cleaning technology Sep*. 2020. 251(15), 117252. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117252>
18. Tselen B., Obodovych O., Nedbailo A., Hozhenko L., Radchenko N. Optymizatsiia protsesu vodopidhotovky dlia vidnovlennia sokiv za dopomohoiu hidrodynamichnoi kavitatsii [Optimisation of the water treatment process for juice recovery using hydrodynamic cavitation] *Prodovolchi resursy*. 2024. Vol. 12. №23, pp.189-198 DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22> (in Ukr.)
19. Obodovych O., Sablii G., Tselen B., Sydorenko V. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. No. 4/6 (124), pp.28-34 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286005>
20. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Sheiko T. Aeratsiino-okysliuvalne obladnannia dlia pidhotovky pytnoi i tekhnolohichnoi vody [Aeration and oxidation equipment for the preparation of drinking and process water]. *Prodovolchi resursy*. 2023. 11(21), pp.122–132. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12> (in Ukr.)
21. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25, pp.215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
22. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. 53, pp.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
23. Dolinskyi A., Tselen B., Ivanytskyi H., Konyk A., Radchenko N., Hartvih A. Zastosuvannia sposobu dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii dlia neitralizatsii kondensatu produktiv zghoriannia pryrodnoho hazu. *Naukovi pratsi [Application of the method of discrete-pulse energy input for neutralisation of condensate of natural gas combustion products]*. 2017. 81(1), pp.9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663> (in Ukr.)
24. Obodovych O., Sydorenko V., Bulii Yu., Stepanova O. Ochyshchennia stichnykh vod teplovykh elektrostantsii (TES). *Teplofizyka i teploenerhetyka [Treatment of wastewater from thermal power plants (TPPs)]*. 2023. 45 (2), pp.69-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.8> (in Ukr.)
25. Dolinskyi A., Konyk A., Radchenko N., Tselen B., Hozhenko L. Perspektyvnist ta napriamky rozvytku aparativ pryntsyyp roboty iakykh gruntuetsia na mekhanizmach dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii [Perspectiveness and development of apparatus the principle of work is based on the mechanisms of discrete-pulse energy input]. *Teplofizyka i teploenerhetyka*. (2017). 39 (5), pp.7-11. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01>

Отримано 24.01.2025

Received 24.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025

УДК 536.8

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ СОПЛОВОГО ТРАКТУ НА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ТА ГАЗОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ ВИХЛОПУ МАЛОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

Макарчук Б.О.¹, аспірант, Пономаренко С.М.², кандидат фіз.-мат. наук

¹кафедра прикладної фізики навчально-наукового Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», вулиця Академіка Янгеля, 7а, м. Київ, 03056, Україна, e-mail: b.makarchuk@gmail.com

²доцент кафедри прикладної фізики навчально-наукового Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», вулиця Академіка Янгеля, 7а, м. Київ, 03056, Україна, orcid.org/0000-0002-9851-7109, e-mail: sergiy.ponomarenko@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.9>

У роботі розглядається числова 2D та 3D - модель потоку робочого тіла малого турбореактивного двигуна (ТРД) у сопловому тракті з ежектором заданих параметрів, а також аспект впливу ежектора та профільованого сопла на тепловий слід малого ТРД. Отримані поля значень основних параметрів потоку газу на виході з двигуна для 2D - моделі двигуна-аналога у рамках верифікації моделі; окрім цього, модель було верифіковано продувкою повітрям 3D - профілю вихідного двигуна для первинного визначення впливу течії ежектора на параметри вихлопу. Отримано якісний висновок - профілювання сопла малого ТРД у поєднанні із застосуванням ежектора дозволяє створювати вихрові течії, що інтенсифікують теплообмін вторинного потоку ежектора з первинним потоком сопла та знижують температуру вихлопу двигуна. Отримані кількісні результати є відповідними до параметрів існуючого двигуна, що може бути застосований у малогабаритних літальних апаратах (ЛА) з крейсерськими дозвуковими швидкостями з метою збільшення маси корисного навантаження, дальності польоту або зниження теплової помітності апарата.

The work examines numerical 2D and 3D models of the working medium flow in a nozzle duct of a small turbojet engine with a nozzle of specified parameters, as well as the impact of the nozzle and the profiled nozzle on the thermal signature of the small-scale turbojet. The obtained contours of the main gas flow parameters at the engine exit for the 2D engine-analog model within the framework of model verification are presented; in addition, the model was verified through air blowing through the 3D model domain of ejector nozzle to initially evaluate the impact of the ejector flow on the exhaust parameters. A qualitative conclusion was drawn – profiling the nozzle of a turbojet in combination with the use of an ejector can be used to create vortex flows that intensify the heat transfer between the secondary ejector flow and the primary nozzle flow, thus reducing the engine exhaust temperature. The quantitative results obtained correspond to existing model of engine, which can be applied to small-sized aircraft with subsonic cruise speeds to achieve greater payload mass, flight range, or reduced thermal signature of the aircraft

Бібл. 9, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: теорія реактивних двигунів, CFD-моделювання, числове моделювання, ежектор, термодинаміка реактивних двигунів, газодинаміка.

Вступ. У даний момент для швидкісних БПЛА літакового типу великої дальності застосовуються малі турбореактивні двигуни тягою 80-1000 Н. Основною перевагою турбореактивних двигунів перед аналогами (наприклад, пульсуючим реактивним двигуном (РД)) є їхня висока питома потужність, що дозволяє значно зменшити суху масу апарата у порівнянні з поршневи-ми або електричними рушійними установками. Проте у таких двигунів є два суттєві недоліки: низький ККД (до 20%) і висока витрата палива. Другий фактор компенсується високою питомою тягою, натомість перший зумовлює високі теплові втрати двигуна, що призводять до підвищеної (у порівнянні з більшими установками) температури факела двигуна – це ключовий недолік у контексті військового використання малогабаритних РД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних багатофункціональних літальних апаратах широко

використовуються ежекторні сопла з метою збільшення тяги літаків вертикального зльоту та посадки, зниження довжини розбігу літака при зльоті, при форсуванні тяги для вирішення бойових завдань, для зниження концентрації CO₂, CO, NO_x у вихідному струмені двигуна, температури вихідних газів, що істотно зменшує рівень інфрачервоного випромінювання струменя двигуна, а також його шум. Важливими перевагами ежектора є простота конструкції, відсутність рухомих частин, мала вага та невисока вартість; цей пристрій працює у широкому діапазоні зміни параметрів газу і дозволяє легко змінювати режим експлуатації. Залежно від призначення (хімічна, вакуумна, металургійна промисловість), ежектор може мати різну конструкцію [1].

Потік вихлопних газів за двигуном без використання ежектора поступово розширюється і поєднується з атмосферним повітрям, однак гаряча частина струменя

зміщується у центральну область та зберігає свою температуру досить довго. У дослідженні [1] розглянуті результати чисельного моделювання ліній току у газовому ежекторі, з варіюванням величини зазору у вихідному перерізі ежектора; було визначено, що ця величина відіграє важливу роль у змішуванні потоків. При цьому також відзначається збереження гарячого ядра на достатньо великій відстані. Це означає, що у прямолінійному потоці перемішування активного та пасивного потоків за рахунок сил в'язкості відбувається недостатньо інтенсивно. Результати експериментального дослідження показують, що зі зростанням кількості обертів зростає ККД компресора, а питомі витрати палива знижуються, причому це більш помітно для малих обертів двигуна. Також важливим висновком даного твердження є те, що становлення вихідного ежектора слугує ефективним засобом зниження акустичного шуму малого реактивного двигуна [1].

Дослідження [2] показує можливість точного моделювання малих ТРД з використанням математичних моделей поширених гідрогазодинамічних програмних пакетів на прикладі *ANSYS CFX*; досягнута збіжність отриманих з моделювання результатів з реальними показниками двигуна у межах 5%.

Результати дослідження [3] вказують на додаткову вторинну особливість малих ТРД у порівнянні з габаритнішими двигунами – висока температура вихлопу зумовлює варіацію ККД через зміну параметрів навколишнього середовища (висота польоту, вологість повітря тощо), що зумовлює додаткові втрати палива та підвищені навантаження на установку під час польоту за різними профілями (зокрема при переході з малих на великі висоти).

У дослідженні [4] розглядалась модифікація малого ТРД шляхом переробки двигуна у турбовентиляторний (ТРД з високим ступенем двоконтурності). Наведені результати для двигунів тягою до 200 Н вказують на суттєве підвищення тяги (до 40%) та зниження паливної витрати на величину порядку 50-60%, проте потребують установки дороговартісного передаточного механізму для вентилятора двигуна, що у випадку малих БПЛА не завжди є економічно вигідним рішенням.

Деякі реактивні двигуни мають конструктивні особливості, що оптимізують параметри вихідного потоку (вихлопу) під необхідні умови їх роботи, наприклад, маючи таку геометрію, що створює штучні вихрові течії, які коригують характеристики потоку на виході з сопла [5]. Комбінація сопла складної форми та профільованого ежектора може створювати турбулентні зони та інтенсифікувати змішування потоків у сопловому тракті загалом, завдяки чому має зрости ефективність ежектора і ККД двигуна в цілому.

Рішення проблем створення ежектора для малого ТРД у значній мірі можна описати як задачу оптимізації двигуна під визначені умови його роботи. До основних поширених функцій ежектора відносяться: зниження споживання пального, зменшення вартості години роботи або покращення характеристик двигуна — таких, як тяга, питомий імпульс та інші спеціальні параметри установки. Основними проблемами малих ТРД є малий ККД (близько 20% у діапазоні тяг 100-1000 Н) та висока температура вихлопу у порівнянні з більшими двигунами. Ежектор може покращити характеристики двигуна з мінімальним приростом маси та вартості виробу.

Об'єктом дослідження у даній роботі є форма та профіль сопла двигуна та форма ежектора, вигляд яких показаний на рис. 1.

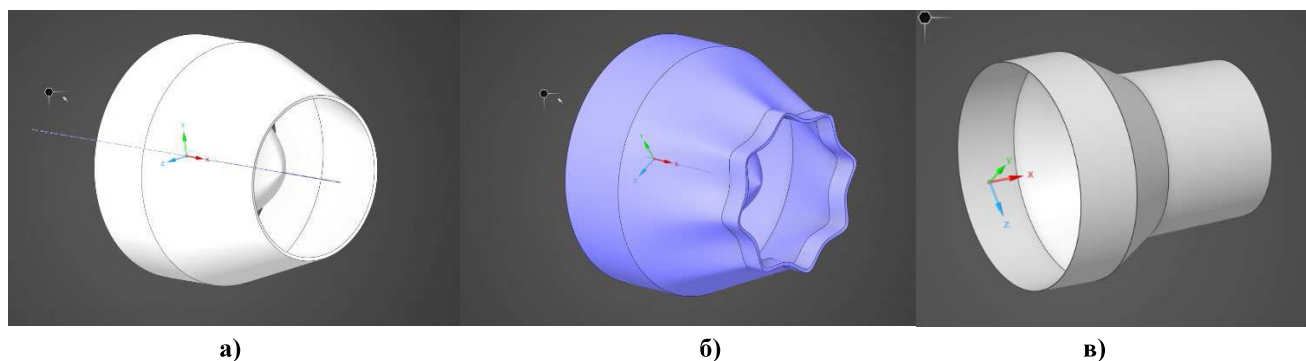


Рис. 1. 3D-моделі досліджуваних елементів соплового тракту малого ТРД:

а) – сопло двигуна, б) – профільоване сопло-змішувач, в) – ежектор

Fig. 1. 3D-models of studied engine nozzle components:

a) – standard engine nozzle, b) – mixer nozzle, c) ejector nozzle

Завданням роботи є дослідження методу ежекторно-го впорскування у малому ТРД шляхом числового моделювання його соплового тракту та якісного і кількісного аналізу модифікованої конструкції, що використовує комбінацію «ежектор-змішувач» для зниження теплового сліду двигуна.

Метою даного дослідження є оцінка доцільності використання модифікованого сопла та ежектора з інтенсифікацією змішування для зниження теплової помітності та підвищення паливної ефективності малого ТРД, використовуючи термогазодинамічне числове моделювання соплового тракту двигуна.

Методика даного дослідження полягає у термо- та газодинамічному числовому моделюванні потоку газу у сопловому тракті малого ТРД за допомогою програмного пакету ANSYS Fluent 2024 R1, на основі геометрії, побудованої у САПР ANSYS Discovery 2024 та розрахункової сітки, розробленої у пакеті ANSYS Meshing. Параметри для побудови геометрії отримані з технічних характеристик існуючого двигуна для спрощення верифікації числової моделі. Отримані результати моделювання були проаналізовані інструментами *Fluent* на предмет змін температури потоку на різних відстанях від зрізу сопла, а також інших параметрів, що характеризують змішування холодного потоку з ежектора та газу на виході з сопла двигуна.

Постановка задачі. Для побудови основної верифікаційної та робочої моделі були використані технічні характеристики існуючого малого ТРД *JetCat* P180 [6] (табл. 1). Також були розглянуті результати попередніх досліджень авторів [7] та [8], де було проаналізовано роботу двигунів аналогічних розмірів

і характеристик. Геометрія та параметри установок з вищезгаданих робіт були використані для первинної верифікації нової розрахункової моделі шляхом продувки 2D-профілів соплового тракту двигунів з відомими параметрами.

Граничні умови задані на зрізі соплового тракту двигуна, стінках та вихідному перерізі розрахункової області. Температура та тиск задані відповідно до документації по ТРД; тиск і температура зовнішнього середовища відповідні до атмосферних умов на рівні моря.

Товщина стінки сопла — 1 мм, ежектора — 0,1 мм; матеріал стінки ежектора — сталь, що є наявним у базі програмного пакету.

У математичній моделі описується газодинаміка потоку розжареного стисливого газу на виході з сопла малого ТРД та ежектора. Для даної моделі задані умови: температура вихлопу 1000 К, тиск відповідний до значення тяги двигуна на форсажі, тиск навколишнього середовища атмосферний на рівні моря (101,3 кПа). У процесі первинної верифікації було виявлено, що вплив хімічних реакцій у потоці вихлопних газів незначний (увімкнення модуля кінетики хімічних реакцій не змінило термодинамічну картину потоку), відповідно у робочій моделі задана суміш продуктів згоряння заданої температури та тиску; було визначено, що для малих ТРД з діапазоном температур вихлопу 500-1000 К задачу можна розв'язувати як стаціонарну з моделлю стисливості ідеального газу з достатньою точністю.

Для моделювання було використано програмний пакет відкритого доступу *ANSYS Student 2024 R1*. Для розрахунків застосовано підпроцесор *Fluent* з

Таблиця 1. Технічні характеристики малого турбореактивного двигуна JetCat P180 [6]

Table 1. Technical specifications of JetCat P180 small-scale turbojet engine [6]

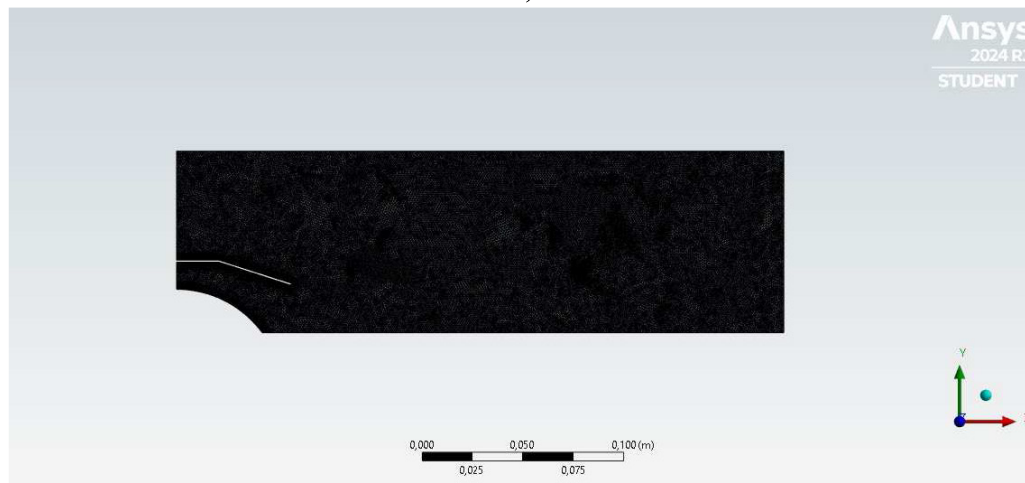
Найменування показника, розмірність	Значення показника
Ступінь стиснення	3,5
Масова витрата потоку (кг/с)	0,38
Маса установки (кг)	1,71
Діаметр установки (мм)	112
Довжина установки (мм)	283
Температура вихлопу, °С	520-750
Оберти холостого ходу (1/хв)	32000
Максимальні оберти (1/хв)	126000
Тяга у холостому режимі (Н)	7
Тяга на форсажі (Н)	175
Швидкість вихлопного потоку (км/год)	1658
Вихідна теплова потужність вихлопу (кВт)	40,3

методологією CFD та розрахункову модель Pressure-based Numerical Solver зі схемою корекції полів тиску і швидкості SIMPLEC.

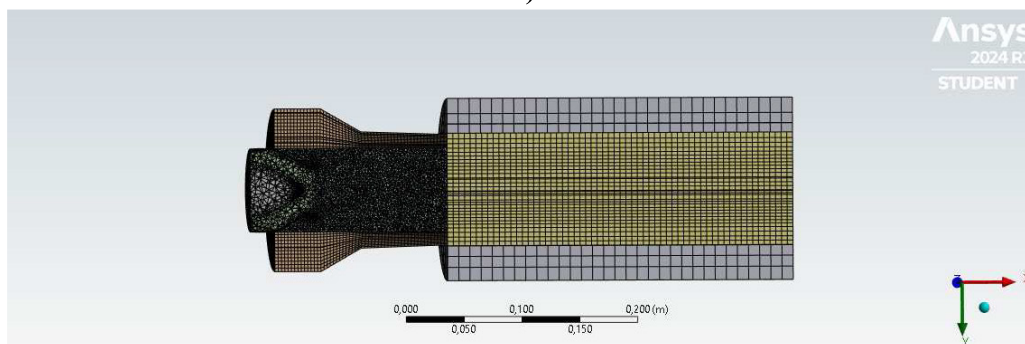
Задача симетрична відносно центральної осі камери сопла. У первинному верифікаційному розрахунку використовувалась модель турбулентності $k-\varepsilon$ типу RNG,



а)



б)



в)

Рис. 2. Розрахункові сітки досліджуваних моделей: а) – верифікаційна модель, 2D-профіль, двигун Hamilton Sundstrand TJ-50, б) – 2D-профіль, JetCat P180, в) робоча модель, 3D-профіль, JetCat P180

Fig. 2. Mesh variations in different stages of CFD calculation: a) verification model, 2D-profile, Hamilton Sundstrand TJ-50 engine; b) 2D-profile, JetCat P180; c) final model, 3D-profile, JetCat P180

що у робочій моделі була змінена на $k-\varepsilon$ з розрахунком релаксаційного множника для турбулентної в'язкості (т. зв. схема Realizable $k-\varepsilon$) [9] для підвищення точності розрахунку змішування. Також були проведені тестові продувки повітрям із увімкненою функцією Species Transport, масові складові для яких були розраховані відповідно до документації малого ТРД JetCat P180 [6].

При побудові первинної верифікаційної моделі розрахунку були застосовані 2D-профілі двигунів-аналогів з осьовою симетрією, нижня грань яких є віссю симетрії, сопло та ежектор представлені вирізами відповідної форми у розрахунковій області, що задані як стінка заданої товщини.

Побудована розрахункова сітка для 2D-профілів налічувала від 75 до 80 тис. елементів в залежності від моделі двигуна; розрахункова сітка для робочої 3D-моделі налічує близько 400 тис. елементів.

Після первинної верифікації було проведено моделювання потоку у робочому двигуні P180 у дво- та тривимірному виконанні; отримані результати були порівняні з ТТХ двигуна, після чого проведено фінальне моделювання тривимірної розрахункової області з заводським соплом та ежектором і з модифікованим сопловим трактом (спеціально спрофільованим соплом та ежектором двигуна).

Для первинної верифікації моделі було використано пласку двовимірну вісесиметричну геометрію сопла і ежектора та проведено розрахунок на прикладі малого турбореактивного двигуна Hamilton Sundstrand TJ-50, що використовувався в аналогічній задачі з попередніх досліджень [8]. Після первинної верифікації було проведено моделювання аналогічного за розмірністю

профілю двигуна, що розглядається в основній моделі — ТРД JetCat P180 [6].

Для оптимізації розрахунку при збереженні його точності було розглянуто дві моделі — симуляція суміші продуктів згоряння (з використанням модуля Species Transport) та продувка повітрям за моделлю ідеального газу. Було отримано поля температур та масової частки продуктів згоряння, з яких зроблений кількісний висновок, що частка керосину у газовому тракті вихлопу спадає у межах похибки розрахунку; поле температур по осі потоку після виходу з сопла не змінюється, а отже горіння паливної суміші не має помітного впливу на термодинаміку вихлопних газів. За отриманими полями швидкостей та числа Маха досягнута збіжність з параметрами реального двигуна JetCat P180 у межах 3% від фактичних характеристик.

Отже, можемо вважати модель верифікованою та репрезентативною; надалі розрахункова модель використовується у симуляціях потоку через стандартне сопло та ежектор двигуна, і потоку через модифікований сопловий тракт, що містить спеціально профільоване сопло та ежектор.

Результати дослідження.

За результатами моделювання отримані поля тиску, температури, кінетичної енергії турбулентності (рис. 3, 4) та числа Маха потоку газу у тривимірній розрахунковій області; окремо були розглянуті поля температури у поперечній площині потоку. Помітне збільшення кінетичної енергії турбулентності потоку в ежекторі та більш рівномірний розподіл температур вихлопного потоку у випадку використання модифікованого сопла та ежектора.

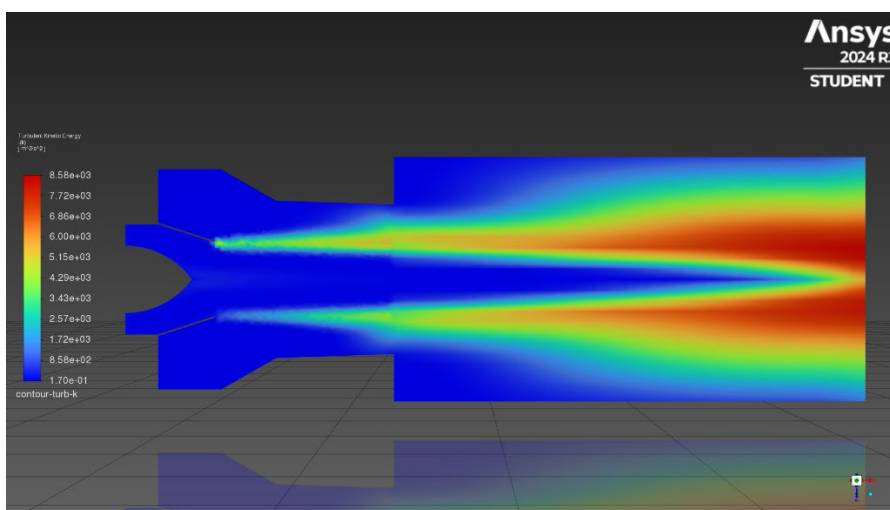


Рис. 3. Поле значень кінетичної енергії турбулентності k (3D-симуляція, стандартне сопло)

Fig. 3. Contour of turbulent kinetic energy k (3D simulation, standard nozzle)

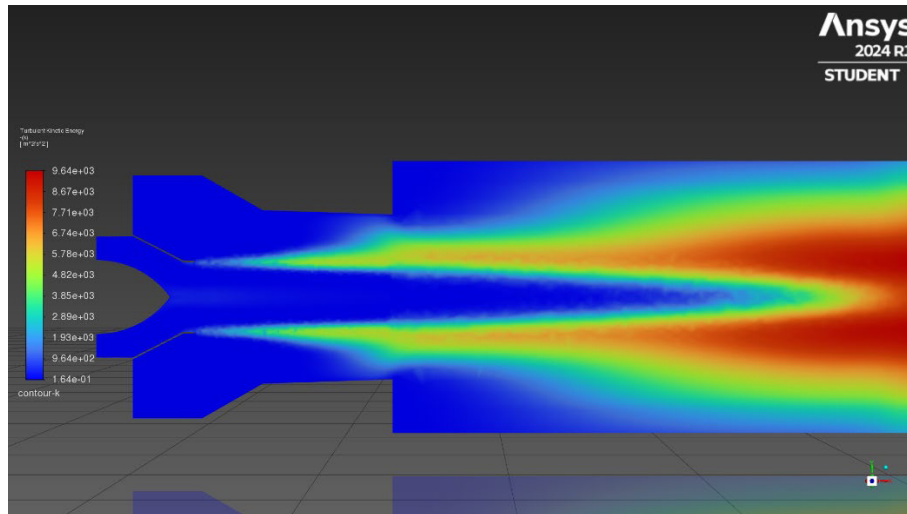


Рис. 4. Поле значень кінетичної енергії турбулентності k (3D-симуляція, профільоване сопло)

Fig. 4. Contour of turbulent kinetic energy k (3D simulation, mixer + ejector nozzle)

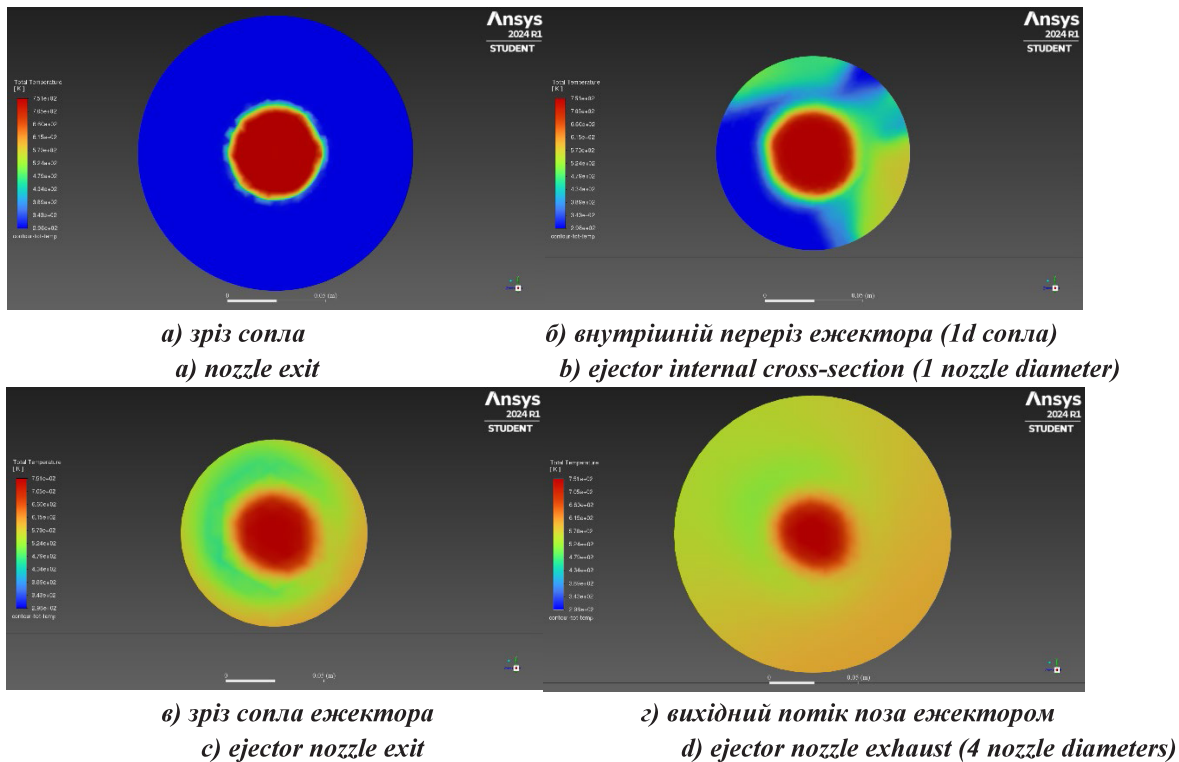


Рис. 5. Поперечний зріз поля значень температур потоку у сопловому тракті (3D-симуляція, стандартне сопло) (а-г, на відстані 1, 2, 3 і 4 діаметрів сопла відповідно)

Fig. 5. Cross-section contour of exhaust temperature (3D simulation, standard nozzle) (a-d, on distance of 1-4 nozzle diameters respectively)

Отримані результати (рис. 5 та 6) вказують на те, що профільоване сопло інтенсифікує змішування потоків гарячого газу на виході з сопла та повітря з ежектора, що помітно зі зниженням температури периферії потоку

з сопла ТРД на деякій віддалі від критичного перерізу (рис. 6в); окрім цього, утворений шар змішаного газу має істотно меншу температуру у порівнянні з ядром потоку.

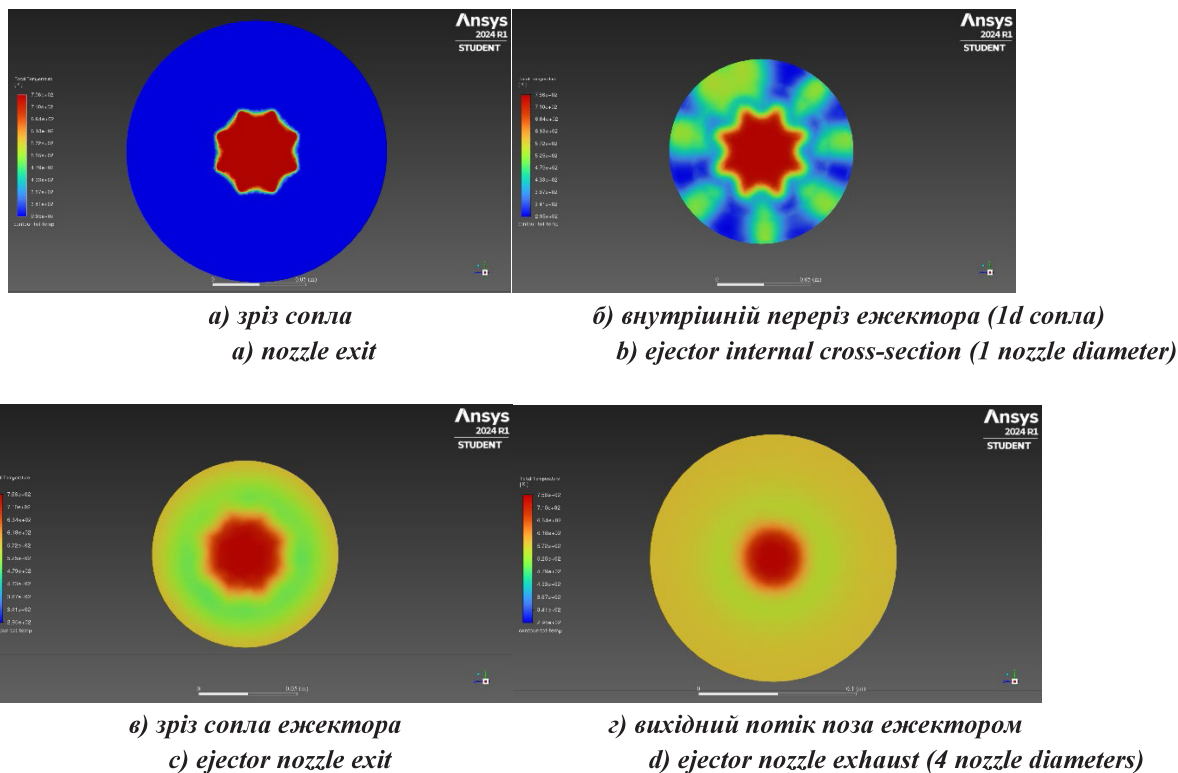


Рис. 6. Поперечний зріз поля значень температур потоку у сопловому тракті (3D-симуляція, профільоване сопло-змішувач) (а-г, на відстані 1, 2, 3 і 4 діаметрів сопла відповідно)

Fig. 6. Cross-section contour of exhaust temperature (3D simulation, mixer + ejector nozzle) (a-d, on distance of 1-4 nozzle diameters respectively)

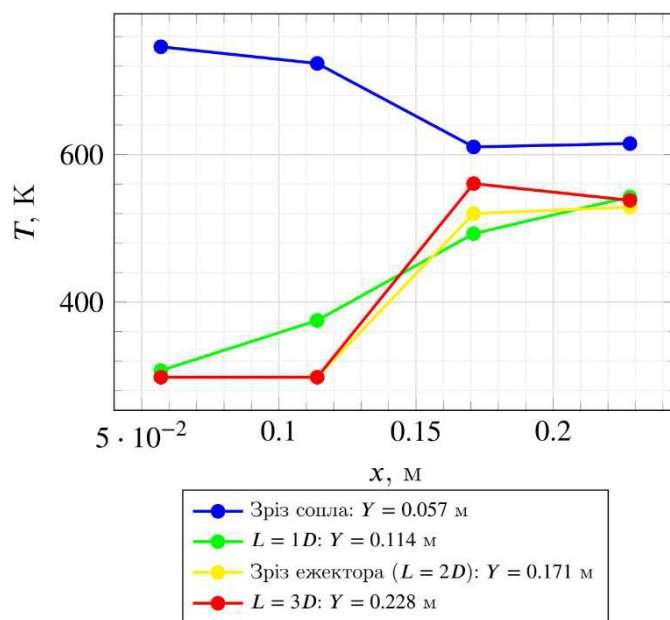


Рис. 7. Профіль температури у поперечному перерізі вихідного потоку двигуна (стандартне сопло + ежектор); лінії на графіку відповідають визначеній відстані по осі Y від ядра потоку

Fig. 7. Exhaust temperature cross-section profile (standard nozzle + ejector); lines correspond to certain distance in Y axis from exhaust core

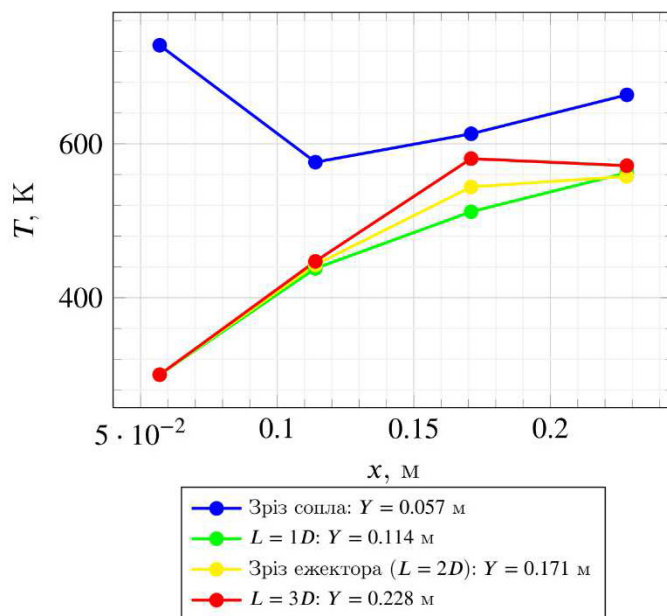


Рис. 8. Профіль температури у поперечному перерізі вихідного потоку двигуна (модифіковане сопло + ежектор); лінії на графіку відповідають визначеній відстані по осі Y від ядра потоку

Fig. 8. Exhaust temperature cross-section profile (mixer nozzle + ejector); lines correspond to certain distance in Y axis from exhaust core

Наведена модель у подальшому буде розвинута з метою кількісного аналізу впливу геометрії сопла та ежектора з інтенсифікацією змішування на параметри вихідного потоку і характеристики малого ТРД.

Висновки. У роботі було розглянуто метод оптимізації параметрів малого ТРД шляхом модифікації його соплового тракту для зниження теплового сліду двигуна. Було здійснене числове моделювання потоку газу у сопловому тракті та ежекторі, отримані дво- та тривимірні профілі потоку для існуючої установки з заводськими параметрами та із застосуванням модифікації (профільювання тракту). Було виявлено, що профільювання сопла малого ТРД у поєднанні з застосуванням ежектора дозволяє створювати вихрові течії, що інтенсифікують теплообмін вторинного потоку ежектора з первинним потоком сопла та здатні знизити температуру вихлопу на величину порядку 10-15% в залежності від відстані до зрізу сопла.

Подальші дослідження соплового тракту з інтенсифікацією змішування можуть бути застосовані з метою оптимізації параметрів існуючих малих ТРД.

Отримані кількісні результати відповідають реальній моделі двигуна, що може бути застосований у малогабаритних літальних апаратах з крейсерськими дозвуковими швидкостями для зниження теплової помітності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. А.А. Халатов, О.Ф. Немчин, С.Г. Кобзар, А.В. Кузьмін, І.І. Борисов. Імпульсно-детонаційні двигуни: сучасний стан і результати дослідження. Ч.1: Сучасний стан. Ліра, Дніпро, Україна, 2024, С. 88. <https://doi.org/10.23877/978-966-981-942-0>.
2. M. Badami, P. Nuccio, and A. Signoretto (2013-07-05). Experimental and numerical analysis of a small-scale turbojet engine. *Energy Conversion and Management*, 76, 225–233.. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.043>.
3. M. Z. Sogut (2020-06-01). Assessment of small scale turbojet engine considering environmental and thermodynamics performance for flight processes. *Energy*, 200, 117519. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117519>.
4. J. Large, A. Pesyridis (2019). Investigation of Micro Gas Turbine Systems for High Speed Long Loiter Tactical Unmanned Air Systems. *Aerospace*, 6(5), 55. <https://doi.org/10.3390/aerospace6050055>.
5. G. Cican, T.-F. Frigioescu, D.-E. Crunteanu, and L. Cristea (February 2023). Micro Turbojet Engine Nozzle Ejector Impact on the Acoustic Emission, Thrust Force and Fuel Consumption Analysis. *Aerospace*, 10, 162. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020162>.
6. JetCat, P180NX Gas Turbine Engine specifications (2011-08-01). [Електронний ресурс] https://www.jetcat.de/en/productdetails/produkte/jetcat/produkte/RC%20ENGINES/Engines/p180_nx.

7. R. Schmidt, A. Hupfer (2021-08-16). Design and numerical simulation of ejector nozzles for very small turbojet engines. CEAS Aeronautical Journal, 12(4), 18 pages. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00537-3>.

8. Y. Shan, J.-z. Zhang, and G.-p. Huang (2014-11-19). Experimental and Numerical Studies on Lobed Ejector Exhaust System for Micro Turbojet Engine. Aerospace. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015358>.

9. ANSYS Theory Guide: Realizable k- ϵ Model. (2009-01-23). [Електронний ресурс] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>.

A RESEARCH ON INFLUENCE OF EXHAUST SHAPE ON THERMODYNAMIC AND FLUID DYNAMIC EXHAUST PROPERTIES OF A SMALL-SCALE JET ENGINE

Makarchuk B.O.¹, Ponomarenko S.M.²

¹Postgraduate, department of Applied Physics, Institute of Physics and Technology, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Academic Yangel st., 7a, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: b.makarchuk@gmail.com

²Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Associate Professor at the Department of Applied Physics, Institute of Physics and Technology, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Academic Yangel st., 7a, Kyiv, 03056, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9851-7109, e-mail: sergiy.ponomarenko@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.9>

The purpose of the study is to evaluate method viability of lowering thermal signature and improvement in fuel efficiency of small turbojet by applying a modification to ejector nozzle assembly of the engine using a CFD model environment. The research examines the numerical 2D and 3D models of the working medium flow in the nozzle duct of a small turbojet engine with a nozzle of specified parameters, as well as the impact of the nozzle and the profiled nozzle on the thermal signature of the small-scale turbojet.

The main task of the study is to obtain a quantitative assessment of potential thermal signature reduction in turbojet exhaust with ejector nozzle comparing to engine without an ejector using comparative CFD analysis of a specially profiled CAD model of ejector nozzle mixer assembly.

The obtained contours of the main exhaust gas parameters for the 2D engine-analog model within the framework of model verification are presented; in addition, the model was verified through air blowing through the 3D model domain of ejector nozzle to initially evaluate the impact of the ejector flow on the exhaust parameters. After verification modeling, by using existing small-scale turbojet specifications for the model to simplify comparison, the main CFD calculation was provided for standard non-modified nozzle and ejector mixer nozzle respectively.

A qualitative conclusion was drawn – profiling the nozzle of a turbojet in combination with the use of an ejector

can be used to create vortex flows that intensify the heat transfer between the secondary ejector flow and the primary nozzle flow, thus reducing the overall exhaust temperature. Further study of modification influence on exhaust parameters can significantly improve the mixing in domain, resulting in bigger reduction of temperature and potential improvement in terms of thrust and/or fuel efficiency.

The quantitative results obtained (a reduction in exhaust temperature of about 10-15% depending on distance from the exhaust core) correspond to the real engine model, which can be applied in small-sized aircraft with subsonic cruise speeds to achieve greater payload mass, flight range, or reduced thermal signature of the aircraft.

References 9, tabl. 1, fig. 8.

Key words: jet engine theory, CFD simulation, numerical simulation, ejector nozzle, jet engine thermodynamics, fluid dynamics.

1. A.A. Khalatov, A.F. Nemchin, S.G. Kobzar, A.V. Kuzmin, I.I. Borisov. Pulse Detonation Engines: Current State and Results of Studies. Part 1: Current State. Lira LTD, Dnipro, Ukraine, 2024, P. 88. (in ukr.) <https://doi.org/10.23877/978-966-981-942-0>.

2. M. Badami, P. Nuccio, and A. Signoretto (2013-07-05). Experimental and numerical analysis of a small-scale turbojet engine. *Energy Conversion and Management*, 76, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.043>.

3. M. Z. Sogut (2020-06-01). Assessment of small scale turbojet engine considering environmental and thermodynamics performance for flight processes. *Energy*, 200, 117519. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117519>.

4. J. Large, A. Pesyridis (2019). Investigation of Micro Gas Turbine Systems for High Speed Long Loiter Tactical Unmanned Air Systems. *Aerospace*, 6(5), 55. <https://doi.org/10.3390/aerospace6050055>

5. G. Cican, T.-F. Frigioescu, D.-E. Crunteanu, and L. Cristea (February 2023). Micro Turbojet Engine Nozzle Ejector Impact on the Acoustic Emission, Thrust Force and Fuel Consumption Analysis. *Aerospace*, 10, 162. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020162>.

6. JetCat, P180NX Gas Turbine Engine specifications (2011-08-01). [Digital source] https://www.jetcat.de/en/productdetails/produkte/jetcat/produkte/RC%20ENGINES/Engines/p180_nx.

7. R. Schmidt, A. Hupfer (2021-08-16). Design and numerical simulation of ejector nozzles for very small turbojet engines. *CEAS Aeronautical Journal*, 12(4), 18 pages. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00537-3>.

8. Y. Shan, J.-z. Zhang, and G.-p. Huang (2014-11-19). Experimental and Numerical Studies on Lobed Ejector Exhaust System for Micro Turbojet Engine. Aerospace. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015358>.

9. ANSYS Theory Guide: Realizable k- ϵ Model. (2009-01-23). [Digital source] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>.

Отримано 07.02.2025

Received 07.02.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 620.92

ПРОМІЖНИЙ ПІРОЛІЗ ЯК ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РІДКИХ МОТОРНИХ БІОПАЛИВ

Желєзна Т.А.¹, канд. техн. наук, Драгнєв С.В.², канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.10>

Представлено етапи і перспективи розвитку технології проміжного піролізу біомаси. Проаналізовано і порівняно характеристики біонафти швидкого піролізу і проміжного піролізу біомаси. Розглянуто паливні властивості біонафти термокаталітичного риформінгу біомаси. Розроблено рекомендації для подальшого дослідження та розвитку технологій піролізу біомаси в Україні.

The stages and prospects for the development of intermediate pyrolysis of biomass are presented. The characteristics of bio-oil from fast pyrolysis and intermediate pyrolysis of biomass are analysed and compared. The fuel properties of bio-oil from thermo-catalytic reforming of biomass are considered. Recommendations for further research and development of biomass pyrolysis technologies in Ukraine are developed.

Бібл. 25, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: біомаса, рідке біопаливо, біонафта, швидкий піроліз, проміжний піроліз, піропаливо.

ГТЗ – гідротермальне зрідження;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;

ЦКШ – киплячий шар, що циркулює;

мас. – масовий;

FAME – метилові естери жирних кислот;

HDO – гідродезоксигенація;

HHV – вища теплота згорання;

HVO – гідроочищена рослинна олія;

SVO – пряма рослинна олія;

TCR – термокаталітичний риформінг.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю заміщення викопних моторних палив альтернативними низьковуглецевими. Такими можуть бути певні види біопалива, зокрема піропаливо проміжного піролізу біомаси. Біонафта проміжного піролізу має якість, достатню для безпосереднього використання у двигунах, а підвищення її якості розширює діапазон застосування як моторного палива. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для розвитку технологій піролізу біомаси в Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Біонафта швидкого піролізу біомаси та її характеристики

Піроліз є технологією термохімічної конверсії сировини за відсутності кисню або повітря. Трьома продуктами піролізу біомаси є деревне вугілля, рідкі фракції і піролізний газ. Відносний обсяг кожного з

продуктів залежить від виду біомаси, температури процесу та часу перебування піролізних парів і твердої речовини у зоні реакції. Основними напрямками розвитку технології піролізу біомаси довгий час були повільний піроліз для отримання деревного вугілля і швидкий піроліз для максимізації виробництва рідкого продукту. При повільному піролізі за температури близько 400 °C і довгому часі перебування гарячів парів та твердої речовини вихід деревного вугілля складає до 35% по масі. При швидкому піролізі за температури 500 °C і короткому часі перебування гарячів парів (< 2 сек) та твердої речовини у зоні реакції вихід рідкого продукту може сягати 75% мас. Збільшення обсягу піролізної рідини (інші терміни – біонафта, піропаливо) досягається дуже високою швидкістю нагріву сировини (біомаси), яка зазвичай повинна бути мілко подрібненою (розмір часток < 3 мм) і мати вологість до 10% [1].

Швидкий піроліз може реалізовуватися у реакторах різної конструкції, наприклад, реактор з киплячим шаром, з ЦКШ, установка з двома реакторами киплячого шару, абляційний, реактор з піролізом у потоці. Одні конструкції, такі як реактор з киплячим шаром, з ЦКШ, обертовий конус (різновид абляційного реактора), вже досягли комерційного рівня, тоді як інші знаходяться на стадії дослідження і розвитку. Прикладом комерційного рівня технології є робота установок швидкого піролізу біомаси Empuro Hengelo Twence (Нідерланди), GFN Lieksa (Фінляндія), Pyrocel Gavle (Швеція). На установках виробляється біонафта в процесі абляційного піролізу у обертовому конусі, розробленому компанією BTG Bioliquids (Нідерланди) [2, 3].

Якість біонафти залежить від виду сировини і типу реактора, в якому реалізована технологія. Найбільший вплив на якість продукту має хімічний склад біомаси. У порівнянні з нафтопродуктами, біонафта швидкого піролізу характеризується низькою хімічною стабільністю, невеликою теплотворною здатністю (HHV 14...20 МДж/кг), значним вмістом води (> 25% мас.), високими в'язкістю і кислотністю (табл. 1) [4-6]. В цілому це визначає її доволі посередні паливні властивості. Міжнародний стандарт ASTM D7544 визначає характеристики біонафти категорій G і D для можливості її використання у спеціально обладнаних промислових пальниках (категорія G) або комерційних/промислових пальниках (піропаливо категорії D з нижчим вмістом твердих часток і золи) [7]. Зокрема, вища теплота згорання біонафти має бути не нижче 15 МДж/кг, вміст води – не більше 30% мас., кінематична в'язкість при 40 °С – не вище 125 мм²/с, зольність – не більше 0,25% мас. (G) або 0,15% мас. (D). При цьому піропаливо категорії G не призначене для застосування у побутових або невеликих комерційних

котлах, двигунах, а також на морському транспорті, а біонафта категорії D може застосовуватися тільки якщо зазначене обладнання спеціально модифіковане під таке паливо.

Для використання біонафти як моторного палива необхідне суттєве покращення її властивостей, для чого застосовують фізичні, хімічні та фізико-хімічні методи. Підвищення якості можна досягти за допомогою традиційних технологій, таких як етерифікація, гідрогенізація, паровий риформінг, емульгування та крекінг, а також нових технологій, таких як вакуумна та молекулярна дистиляція, екстракція за допомогою надкритичної рідини та мембранна сепарація [8-10].

Проміжний піроліз як альтернатива швидкому піролізу при виробництві рідких біопалив

Проміжний піроліз відрізняється від швидкого піролізу швидкістю нагріву сировини, яка є значно нижчою, в діапазоні 1...10 °С/с (при швидкому піролізі – 10...200 °С/с) [11]. Це призводить до меншого утворення смол, оскільки замість термічного крекінгу біополімеру відбуваються більш контрольовані хімічні реакції. Проміжний піроліз проходить за помірних температур (400...500 °С), а час перебування піролізних парів вимірюється секундами. На відміну від повільного і швидкого піролізу, проміжний піроліз націлений не на отримання максимального виходу певного продукту, а на виробництво якісних продуктів, готових до безпосереднього використання, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання [12, 13].

Виділяють три етапи розвитку технології проміжного піролізу: (1) реактор Haloclean, (2) технологія Pyroformer і (3) технологія термokatалітичного риформінгу TCR. Піролізний реактор Haloclean (обертова піч) був розроблений в кінці 1990-х років у науково-дослідницькому центрі м. Карлсруе (Forschungszentrum Karlsruhe,

Табл. 1. Характеристики біонафти швидкого піролізу різних видів біомаси [4-6]

Table 1. Characteristics of bio-oil from biomass fast pyrolysis [4-6]

Характеристики	Види біомаси			Нафта (для порівняння)
	Лушпайка рису	Стебла кукурудзи	Деревина	
Температура піролізу, °С	450...600	450...480	450...600	–
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	9,5...17,4	13,9...22,3	14,0...21,9	40,0
Вміст води, % мас.	25...34	27	16...26	0,1
Зольність, % мас.	0,29	0,26	0,12	0,1
Густина, кг/м ³	1113...1210	1150...1170	1200...1240	< 980
Кінематична в'язкість (40 °С), мм ² /с	82...97	41,4	41...77	20...200 (80°С)
Кислотність, рН	2,6...3,4	2,2...3,2	2,3...3,2	–
Температура спалаху, °С			62...95	< 130

Німеччина). Вихідною метою розробки процесу піролізу була переробка електронного брухту із відокремленням галогенів для отримання палива та повторного використання металу. У 2000 р. технологію було успішно адаптовано під піроліз біомаси, у тому числі лігноцелюлозної; визначено, що для піролізу гранул з соломи оптимальною температурою процесу є 400 °С. Недоліком реактору Haloclean вважається його робота при атмосферному тиску, що обмежує якість отриманих продуктів і сферу їх подальшого використання. Хоча отримана піролізна рідина має значно нижчий вміст смол і в'язкість порівняно з біонафтою швидкого піролізу, вона не придатна до довготривалого використання у ДВЗ.

Технологія Pyroformer розроблена Європейським інститутом біоенергетичних досліджень (EBRI, Об'єднане Королівство). Першу пілотну установку споруджено у 2009 р., наступну (вдосконаленої конструкції) – у 2013 р. Горизонтальний реактор Pyroformer має подвійний коаксимальний шнек, який обертається і рухає суміш свіжої сировини і рециркульованої частини деревного вугілля (рис. 1). Проміжний піроліз відбувається за температури 350...450 °С і тиску до 1 МПа. Внутрішня рециркуляція гарячого деревного вугілля і його тривалий контакт з піролізними парами забезпечують досягнення кращої якості кінцевих продуктів. Таким чином, деревне вугілля, багата на вуглець пориста речовина, фактично відіграє роль каталізатора.

Технологія Pyroformer відпрацьована на різних

видах біомаси, таких як лушпайка рису, деревина, солома, оливкові кісточки та ін. Типовий вихід продуктів проміжного піролізу: газ – 20...25% мас., біонафта – 40...50% мас., деревне вугілля – 20...30% мас. При додаванні каталізатору вихід піролізного газу може збільшитися до 39% мас. [14, 15]. Порівняно з біонафтою швидкого піролізу, рідкий продукт технології Pyroformer має менший вміст води, меншу в'язкість і більш високу теплотворну здатність (табл. 2) [16]. Експериментальні дослідження підтвердили можливість використання суміші біонафти Pyroformer (20%) з біодизелем (80%) у багатоциліндрових двигунах із непрямым уприскуванням і запалюванням від стиснення [17].

Технологію термокаталітичного риформінгу TCR, яка вважається третім поколінням проміжного піролізу, розроблено в Інституті екології, безпеки та енергетичних технологій (Fraunhofer UMSICHT, Німеччина). Технологія TCR була досліджена на лабораторній установці потужністю 2 кг/год (по сировині) та відпрацьована на пілотній установці 30 кг/год (2014 р.), а з 2016 р. працює демонстраційна установка 300 кг/год. Суттєвою інновацією TCR порівняно з Pyroformer є інтегрований у загальний процес етап каталітичного риформінгу піролізних парів. Це дає можливість отримувати кінцеві продукти більш високої якості [12]. Реактор TCR складається з двох послідовно розташованих частин (рис. 2). У першій (горизонтальній) відбувається проміжний піроліз біомаси за температури 400...450 °С і швидкості

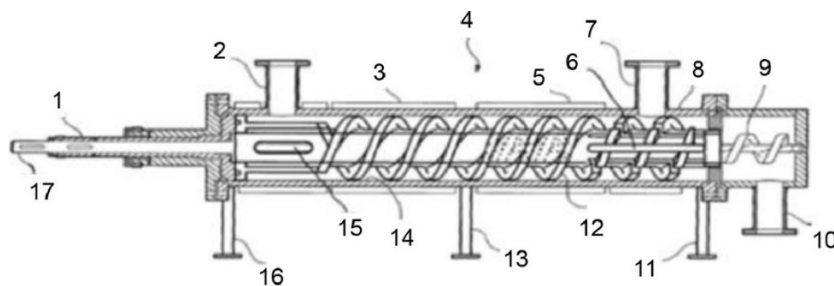


Рис. 1. Реактор Pyroformer [15], де:

1 – вал зовнішнього шнеку, 2 – патрубок для подачі сировини, 3, 4, 5 і 8 – електронагрівальні стрічки, 6 – шліць зовнішнього шнеку, 7 – газовідвідна труба, 9 – внутрішній шнек, 10 – патрубок для відведення твердої речовини, 11, 13 і 16 – опори, 12 і 14 – зовнішній шнек, 15 – шліць зовнішнього шнеку, 17 – вал внутрішнього шнеку

Fig. 1. Pyroformer reactor [15], where:

1 – external screw shaft, 2 – feed inlet pipe, 3, 4, 5 і 8 – electrical heating bands, 6 – external screw slot, 7 – gas outlet pipe, 9 – internal screw, 10 – solid drop out pipe, 11, 13 і 16 – supports, 12 і 14 – external screw, 15 – external screw slot, 17 – internal screw shaft

Табл. 2. Характеристики сировини та продуктів проміжного піролізу технології Pyroformer [16]

Table 2. Characteristics of feedstock and products of Pyroformer intermediate pyrolysis [16]

Показники	Сировина	
	Деревина	Солома ячменя
СИРОВИНА		
Елементний аналіз, % мас.:		
C	47,5	44,2
H	5,3	6,1
N	0,4	0,4
O (розраховано по різниці)	36,4	30,4
S	< 0,1	0,6
Cl	< 0,1	0,4
Леткі речовини, % мас.	82,1	74,9
Вологість, % мас.	7,0	11,9
Зв'язаний вуглець, % мас.	7,7	7,2
Зольність, % мас.	3,2	6,0
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	18,2	17,0
ПРОЛІЗНА НАФТА		
Елементний аналіз, % мас.:		
C	55,69	62,57
H	7,93	8,12
N	0,36	1,41
O (розраховано по різниці)	36,02	25,79
Кислотне число TAN, мг КОН/г	47,5	30,9
Вологість, % мас.	15,4	5,8
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	24,2	28,9
Кінематична в'язкість (40 °C), мм ² /с	14,8	30,5
Густина (20 °C), г/мл	1,10	1,15
Коксовий залишок, % мас.	3,55	6,50
Зольність, % мас.	0,18	0,20
ПРОЛІЗНИЙ ГАЗ		
Склад, %:		
Водень H ₂	2,24	1,54
Кисень O ₂	—	0,42
Азот N ₂	5,54	4,68
Монооксид вуглецю CO	34,7	21,74
Метан CH ₄	7,24	10,48
Діоксид вуглецю CO ₂	50,27	60,13
Вища теплотворна здатність, МДж/м ³	7,27	6,92
ДЕРЕВНЕ ВУГІЛЛЯ		
Елементний аналіз, % мас.:		

C	75,6	74,83
H	3,38	3,51
N	0,22	0,10
O (розраховано по різниці)	10,20	8,46
Зольність, % мас.	10,60	13,10
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	30,1	32,9

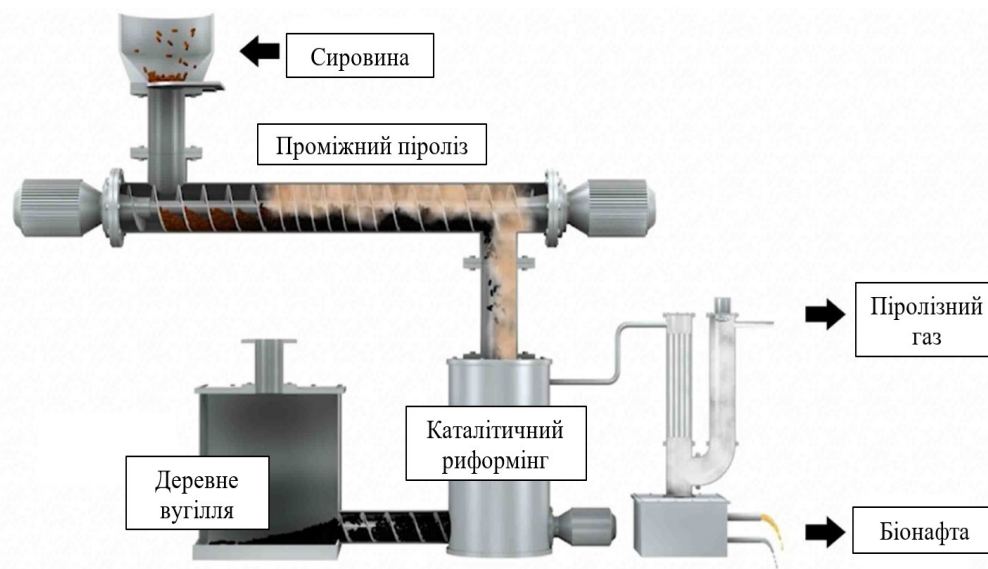


Рис. 2. Реактор TCR [19]

Fig. 2. TCR reactor [19]

нагріву сировини 1...10 °C/с. Сировина пересувається по горизонтальній частині реактору шнеком і попадає до другої (вертикальної) частини установки, де проходить каталітичний риформінг за температури 500...700 °C. В процесі реакції з утворенням деревним вугіллям піролізні пари трансформуються у багатий на водень синтетичний газ і суміш біонафти з водою у газовій фазі. Оптимізовані умови процесу в різних зонах реактора запобігають утворенню смол та інших забруднюючих речовин. Вихід окремих продуктів залежить від хімічних властивостей сировини, а якість і характеристики продуктів майже не залежать від властивостей вихідної біомаси. Типовий вихід піропалива по масі становить 9...12%, піролізного газу – 20...40%, деревного вугілля – 30...40%, води процесу – 20...30%. Орієнтовний енергетичний баланс продуктів наступний: біонафта і деревне вугілля – по 35%, піролізний газ – 25% [14, 18, 19].

Піропаливо, отримане за технологією TCR, є термічно стабільним, що дає можливість піддавати його дистиляції. В свою чергу, це є базою для за-

стосування інших термохімічних технологій для підвищення якості рідкого продукту, наприклад, гідроочищення. Піропаливо TCR характеризується низьким співвідношенням кисню до вуглецю O/C – 0,09, тоді як для рідкого продукту інших технологій проміжного піролізу (Haloclean, Pyroformer) це показник складає 0,29...0,31. Крім того, біонафту TCR можна безпосередньо змішувати з дизельним паливом і біодизелем, а також легко інтегрувати у технологічні процеси нафтопереробних заводів.

Якість біонафти TCR може бути покращена за допомогою гідрозоксигенації (HDO). У порівнянні з необробленою піролізною рідиною, біонафта HDO має помітно вищу теплоту згорання (42,3 МДж/кг), що є співставним з теплотворною здатністю бензину і дизельного палива. Крім того, біонафта підвищеної якості характеризується малим вмістом сірки (101 мг/кг), значно нижчою в'язкістю і практично нульовим кислотним числом (табл. 3). Загалом вважається, що за своїми властивостями біонафта HDO схожа на суміш бензину, керосину і дизельного палива.

Підвищення якості біонафти TCR через технологію гідродезоксигенації було досліджено і відпрацьовано на демонстраційній установці потужністю 500 кг/год по сировині (підсушений осад стічних вод). Роботи було виконано в рамках міжнародного проєкту TO-SYN-FUEL програми ЄС Горизонт 2020 (2017-2022 рр.). Основним результатом реалізації проєкту є робоча демонстраційна установка TCR, що виробляє біонафту підвищеної якості, яка за своїми характеристиками відповідає суміші стандартизованих дизельного палива і бензину [20]. Дані експериментальних досліджень свідчать про можливість різних варіантів застосування необробленої і покращеної біонафти TCR у ДВЗ [12].

Перспективи розвитку технології проміжного піролізу

Перспективним напрямком розвитку технології проміжного піролізу є виробництво рідких біопалив для водного транспорту. Це є актуальним питанням, оскільки в Євросоюзі приділяється велика увага декарбонізації транспорту, зокрема, використанню відновлюваних та низьковуглецевих палив в авіації і на морському транспорті [23]. Серед альтернативних палив для морського транспорту зазвичай розглядають скраплений природний газ, метанол, аміак, водень та деякі види біопалива, зокрема, пряму рослинну олію (SVO), біодизель (FAME), відновлюване дизельне паливо (HVO), зріджений біогаз. Всі види біопалива

мають особливості і певну нішу свого застосування. Наприклад, FAME, HVO і біопаливо ГТЗ найбільш підходять для заміщення суднового дизельного палива та морського газойлю, зріджений біогаз – для заміни скрапленого природного газу, SVO – для використання замість мазуту [24].

Розвиток і вдосконалення технології проміжного піролізу біомаси дає можливість підвищити рейтинг біонафти серед альтернативних водних палив і наблизити її до практичного застосування на судах. Зазначені завдання включено до виконання у проєкті SEAFARER (2024-2028 роки) програми ЄС «Горизонт Європа». У проєкті планується розвиток технології термokatалітичного риформінгу TCR і спорудження демонстраційної установки за вдосконаленою технологією проміжного піролізу (VINTER). Будуть досліджуватися паливні характеристики необробленого піропалива та біонафти підвищеної якості. Установка VINTER працюватиме на трьох видах біомаси – лушпинні соняшника, деревних відходах і вичавках агави. Передбачено 30-денне демонстраційне плавання морського судна на біонафті проміжного піролізу. Зі сторони України в проєкті SEAFARER беруть участь експерти Біоенергетичної асоціації України.

Висновки та рекомендації для України

Україна має значний сировинний та технічний потенціал для виробництва різних видів біопалив, у тому числі рідких моторних. Одним з можливих

Табл. 3. Порівняння характеристик біонафти TCR і біонафти швидкого піролізу біомаси [13]

Table 3. Characteristics of TCR bio-oil and bio-oil from biomass fast pyrolysis [13]

Показники	Необроблена біонафта TCR	Біонафта TCR підвищеної якості (HDO)	Біонафта швидкого піролізу деревини [5, 15, 21, 22]
Елементний аналіз, % мас.:			
C	77,6	86,2	54...58
H	8,0	13,0	5,5...7,0
N	4,6	< 0,1	0...0,2
S	0,6	101 мг/кг	0...0,05
O (розраховано по різниці)	7,0	< 0,8	35...45
Вміст води, % мас.	2,2	30 мг/кг	15...35
Зольність, % мас.	0,005	немає даних	0...0,2
Нижча теплота згорання, МДж/кг	34,0	42,3	13...18
Температура спалаху, °C	47,0	< -20	62...95
Густина (15 °C), кг/м ³	1014,4	815,7	1200...1240
Кінематична в'язкість (40 °C), мм ² /с	4,43	0,97	40...100
Кислотне число TAN, мг КОН/г	2,1	0,0	88...126

напрямків досліджень та розвитку є проміжний піроліз із використанням широкого спектру біомасової сировини. Проміжний піроліз біомаси у поєднанні з термокаталітичним риформінгом дає можливість отримати біонафту, придатну для використання у ДВЗ, принаймні у суміші з іншими видами рідких біопалив. Застосування технологій підвищення якості біонафти розширює потенційний діапазон її використання як моторного палива.

В Україні є певні теоретичні та практичні напрацювання із досліджень технологій піролізу біомаси. Зокрема, в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено і детально досліджено технологію швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі [25]. Дослідження проведено на деревній тирсі вологістю 4% з розміром часток 0,5...0,7 мм, 0,5...1,0 мм та 0,5...5 мм. В ході експериментів вироблено біонафту густиною 1110...1190 кг/м³ з ННВ близько 14 МДж/кг. Максимально досягнутий вихід піропалива склав 49% мас. Виконані дослідження дозволили визначити оптимальні режимні параметри роботи пілотної піролізної установки. Отриманий досвід дає можливість, за необхідності, спроектувати установку проміжного піролізу з горизонтальним шнеком і доповнити її секцією термокаталітичного риформінгу. Такі роботи рекомендується виконувати в рамках вітчизняного чи міжнародного проєкту із фінансуванням і тривалістю, достатніми для спорудження лабораторної або пілотної установки та налагодження її стабільного функціонування. Альтернативою може бути продовження робіт із вдосконалення технології швидкого абляційного піролізу з метою збільшення виходу біонафти та покращення її паливних характеристик.

Для визначення пріоритетних напрямків розвитку технологій піролізу біомаси в Україні необхідно проаналізувати секторальні потреби у рідких біопаливах, виконати ТЕО і аналіз життєвого циклу різних технологій та кінцевих продуктів, а також взяти до уваги новітні напрацювання зарубіжних фахівців. Зокрема, результати виконання проєкту SEAFAIRER за участі вітчизняних експертів можуть вплинути на вибір технологій піролізу для розвитку і дослідження в Україні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Bridgwater T.* Pyrolysis of biomass. Presentation at ETIP webinar 25.05.2020.
https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy_Webinar-WG2_25-May-2020_Presentation-T-Bridgwater_Aston-University.pdf
2. *Álvarez-Chávez B.J., Godbout S., Le Roux É.* et al. Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts // *Biofuel Research Journal*. – 2019, N 24, p. 1054-1064. DOI: 10.18331/BRJ2019.6.4.2
3. *Reuerman P., Vos J., Lammens T.* White Paper: Fast Pyrolysis Bio-oil (FPBO). Deliverable D6.1 Part 2 of MUSIC project, 2022. https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC_D6-1_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil_FV.pdf
4. *Железна Т.А., Драгнев С.В.* Аналіз напрямків підвищення конкурентоспроможності рідких біопалив другого покоління // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2023, т. 45, № 3, с. 78-87. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>
5. *Prasertpong P.* et al. Characterization of Bio-oils from Jatropha Residues and Mixtures of Model Compounds // *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. – 2017, v. 16 (2), p. 135-144. https://www.researchgate.net/publication/314287475_Characterization_of_Bio-oils_from_Jatropha_Residues_and_Mixtures_of_Model_Compounds#fullTextFileContent
6. *Xiujuan G.* et al. Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2011, v. 19, N 1, p. 116-121. <https://cjche.cip.com.cn/EN/abstract/abstract1942.shtml>
7. *ASTM D7544-23.* Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/115155/5a69c009fa7d49adb0c18b193134558e/ASTM-D7544-23.pdf>
8. *Panwar N.L., Paul A.S.* An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques // *Environmental Engineering Research*. – 2021, v. 26, N 5: 200382. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.382>
9. *Yang H., Yao J., Chen G.* et al. Overview of upgrading of pyrolysis oil of biomass // *Energy Procedia*. – 2014, N 61, p. 1306-1309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087>
10. *Lachos-Perez D., Martins-Vieira J.C., Missau J.* et al. Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques // *Analytica*. – 2023, v. 4, N 2, p. 182-205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>

11. Kazawadi D., Ntalikwa J., Kombe G. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar // *Journal of Renewable Energy*. – 2021, v. 2021: 5533780. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
12. Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A. et al. Two decades of intermediate pyrolysis: a major step towards CHP applicable bio-oils. Paper for 25th Europ. Biomass Conf. and Exhibition, EUBCE 2017, Stockholm 12-15.06.17. https://www.researchgate.net/publication/317822570_TWO_DECADES_OF_INTERMEDIATE_PYROLYSIS_A_MAJOR_STEP_TOWARDS_CHP_APPLICABLE_BIO-OILS
13. Hornung A., Apfelbacher A., Neumann J. et al. Combined heat and power generation from solid biomass derived bioliquids and syngas by TCR® – upgrade of TCR-liquids by hydrodeoxygenation. Paper for 24th European Biomass Conference and Exhibition, EUBCE 2016, Amsterdam, 6-9 June 2016. bit.ly/3ZgKyV5
14. Hornung A. Intermediate Pyrolysis as an Alternative to Fast Pyrolysis. In "BioEnergy IV: Innovations in Biomass Conversion for Heat, Power, Fuels and Chemicals". ECI Symposium Series, 2013. https://dc.engconfintl.org/bioenergy_iv/2/
15. Hornung A., Jahangiri H., Ouadi M. et al. Thermo-Catalytic Reforming (TCR) – An important link between waste management and renewable fuels as part of the energy transition // *Application in Energy and Combustion Science*. – 2022, v. 12, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100088>
16. Yang Y, Brammer J.G., Mahmood A.S.N., Hornung A. Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels // *Bioresource technology*. – 2014, N 169, p. 794–799. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.044>
17. Hossain A.K., Ouadi M., Siddiqui S.U. et al. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of an indirect injection multi-cylinder CI engine fuelled by blends of de-inking sludge pyrolysis oil with biodiesel // *Fuel*. – 2013, v. 105, p. 135–142. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.007
18. Daschner R., Onyishi H. Conversion of biogenic waste into high quality hydrocarbons: recent progress in development of TCR-technology. Newsletter. Direct Thermochemical Liquefaction, IEA Bioenergy, Task 34, PyNe 54, December 2023. <https://task34.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/3/2023/12/PyNe54-komplett.pdf>
19. Di Gruttola F., Jahangiri H., Sajdak M. et al. Thermo-catalytic reforming (TCR) of waste solid grade laminate // *Journal of Cleaner Production*. – 2023, v. 419, 138276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138276>
20. Turning sewage sludge into fuels and hydrogen. TO-SYN-FUEL Project Final publication, 2022. <https://www.tosynfuel.eu/wp-content/uploads/2022/09/TO-SYN-FUEL-Final-Publication.pdf>
21. Oasmaa A., Elliott D.C., Müller S. Quality Control in Fast Pyrolysis Bio-Oil Production and Use // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2009, v. 28, N 3, p. 404–409. <https://doi.org/10.1002/ep.10382>
22. Kass M., Abdullah Z., Biddy M. et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. Report by Oak Ridge National Laboratory, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
23. Железна Т.А., Драгнев С.В. Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного сектору // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2024, т. 46, № 4, с. 82–90. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>
24. Драгнев С.В., Железна Т.А., Гайдай О.І. Перспективи використання альтернативних палив на водному транспорті // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2023, т. 45, № 1, с. 55–63. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.7>
25. Клименко В.М., Баштовий А.І., Зубенко В.І., Антошук Т.О. Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі // *Промислова теплотехніка*. – 2016, т. 38, № 2, с. 48–55. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.06>
aki-gotovi-do-eksportu-stanovit-80-mln-kub-m

INTERMEDIATE PYROLYSIS AS A TECHNOLOGY TO PRODUCE MOTOR BIOFUELS

Zheliezna T.A.¹, Drahnev S.V.²

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

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.10>

The aim of the work is to prepare recommendations for the development of biomass pyrolysis technologies for the production of motor biofuels in Ukraine. Some possible directions of the development may be fast pyrolysis and intermediate pyrolysis. They differ in the heating rate of feedstock and the residence time of pyrolysis vapours in the reactor. For the fast pyrolysis, the first indicator is considerably higher, and the second one is lower, than for the intermediate pyrolysis. Thus, in terms of process parameters, intermediate pyrolysis is in the middle between the fast and slow pyrolysis. The quality of fast pyrolysis bio-oil depends on the type of feedstock and the type of reactor, in which the technology is implemented. The chemical composition of biomass has the biggest impact on the quality of the product. Compared to petroleum products, fast pyrolysis bio-oil is characterized by low chemical stability, low calorific value, considerable water content, high viscosity and acidity. In general, this determines rather mediocre fuel properties of the bio-oil. A feature of intermediate pyrolysis of biomass is that it is not aimed at obtaining the maximum yield of a certain product, but at producing high-quality products ready for direct use, for example, in internal combustion engines. Chemical reactions in the process of intermediate pyrolysis are more controlled than during fast pyrolysis, which leads to less tar formation and makes it possible to obtain bio-oil of sufficiently high quality. There are distinguished three stages of the development of intermediate pyrolysis technology: the Haloclean reactor, the Pyroformer technology and the thermo-catalytic reforming technology TCR. A significant innovation of the TCR technology is that the stage of pyrolysis

vapours catalytic reforming is integrated into the overall process. This makes it possible to obtain higher quality final products. The yield of individual products depends on the chemical properties of the feedstock, and the quality and characteristics of the products are almost independent of the properties of the initial biomass. Pyrolysis fuel oil obtained using TCR technology is thermally stable, which makes it possible to subject it to distillation. In turn, this is the basis for the application of other thermochemical technologies, for example, hydrotreating, to improve the liquid product quality. Ukraine has considerable feedstock resources and technical potential for the production of various types of biofuels, including motor biofuels. One of the possible areas of research and development is intermediate pyrolysis using a wide range of biomass as feedstock. The intermediate pyrolysis of biomass in combination with thermo-catalytic reforming makes it possible to obtain bio-oil suitable for use in internal combustion engines, at least in a mixture with other types of biofuels. The application of technologies to improve the bio-oil quality expands the potential range of its use as a motor fuel. To determine the priority areas for the development of biomass pyrolysis technologies in Ukraine, it is necessary to analyse sectoral needs in biofuels, perform feasibility study and life cycle analysis of various technologies and end products as well as take into account fresh results of the relevant international studies.

References 25, tables 3, figures 2.

Key words: biomass, bio-fuel, biooil, fast pyrolysis, intermediate pyrolysis, pyrolysis fuel oil.

1. *Bridgwater T.* Pyrolysis of biomass. Presentation at ETIP webinar 25.05.2020.

https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy_Webinar-WG2_25-May-2020_Presentation-T-Bridgwater_Aston-University.pdf

2. *Álvarez-Chávez B.J., Godbout S., Le Roux É. et al.* Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts // *Biofuel Research Journal.* – 2019, N 24, p. 1054-1064. DOI: 10.18331/BRJ2019.6.4.2

3. *Reurman P., Vos J., Lammens T.* White Paper: Fast Pyrolysis Bio-oil (FPBO). Deliverable D6.1 Part 2 of MUSIC project, 2022. https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC_D6-1_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil_FV.pdf

4. *Zheliezna T.A., Drahnev S.V.* Analiz napriamkiv pidvyshchennia konkurentospromozhnosti ridkykh biopalyv druhoho pokolinnia [Analysis of directions for increasing the competitiveness of second-generation liquid biofuels.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering.* – V. 45, № 3 (2023), P. 78-87. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>

5. Prasertpong P. et al. Characterization of Bio-oils from Jatropa Residues and Mixtures of Model Compounds // Chiang Mai University Journal of Natural Sciences. – 2017, v. 16 (2), p. 135-144.
https://www.researchgate.net/publication/314287475_Characterization_of_Bio-oils_from_Jatropa_Residues_and_Mixtures_of_Model_Compounds#fullTextFileContent
6. Xiujuan G. et al. Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2011, v. 19, N 1, p. 116-121. <https://cjche.cip.com.cn/EN/abstract/abstract1942.shtml>
7. ASTM D7544-23. Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/115155/5a69c009fa7d49adb0c18b193134558e/ASTM-D7544-23.pdf>
8. Panwar N.L., Paul A.S. An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques // Environmental Engineering Research. – 2021, v. 26, N 5: 200382. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.382>
9. Yang H., Yao J., Chen G. et al. Overview of upgrading of pyrolysis oil of biomass // Energy Procedia. – 2014, N 61, p. 1306-1309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087>
10. Lachos-Perez D., Martins-Vieira J.C., Missau J. et al. Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques // Analytica. – 2023, v. 4, N 2, p. 182-205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>
11. Kazawadi D., Ntalikwa J., Kombe G. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar // Journal of Renewable Energy. – 2021, v. 2021: 5533780. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
12. Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A. et al. Two decades of intermediate pyrolysis: a major step towards CHP applicable bio-oils. Paper for 25th Europ Biomass Conf. and Exhibition, EUBCE 2017, Stockholm 12-15.06.17. https://www.researchgate.net/publication/317822570_TWO_DECADES_OF_INTERMEDIATE_PYROLYSIS_A_MAJOR_STEP_TOWARDS_CHP_APPLICABLE_BIO-OILS
13. Hornung A., Apfelbacher A., Neumann J. et al. Combined heat and power generation from solid biomass derived bioliquids and syngas by TCR® – upgrade of TCR-liquids by hydrodeoxygenation. Paper for 24th European Biomass Conference and Exhibition, EUBCE 2016, Amsterdam, 6-9 June 2016. bit.ly/3ZgKyV5
14. Hornung A. Intermediate Pyrolysis as an Alternative to Fast Pyrolysis. In "BioEnergy IV: Innovations in Biomass Conversion for Heat, Power, Fuels and Chemicals". ECI Symposium Series, 2013. https://dc.engconfintl.org/bioenergy_iv/2/
15. Hornung A., Jahangiri H., Ouadi M. et al. Thermo-Catalytic Reforming (TCR) – An important link between waste management and renewable fuels as part of the energy transition // Application in Energy and Combustion Science. – 2022, v. 12, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100088>
16. Yang Y, Brammer J.G., Mahmood A.S.N., Hornung A. Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels // Bioresource technology. – 2014, N 169, p. 794–799. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.044>
17. Hossain A.K., Ouadi M., Siddiqui S.U. et al. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of an indirect injection multi-cylinder CI engine fuelled by blends of de-inking sludge pyrolysis oil with biodiesel // Fuel. – 2013, v. 105, p. 135–142. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.007
18. Daschner R., Onyishi H. Conversion of biogenic waste into high quality hydrocarbons: recent progress in development of TCR-technology. Newsletter. Direct Thermochemical Liquefaction, IEA Bioenergy, Task 34, PyNe 54, December 2023. <https://task34.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/3/2023/12/PyNe54-komplett.pdf>
19. Di Gruttola F., Jahangiri H., Sajdak M. et al. Thermo-catalytic reforming (TCR) of waste solid grade laminate // Journal of Cleaner Production. – 2023, v. 419, 138276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138276>
20. Turning sewage sludge into fuels and hydrogen. TO-SYN-FUEL Project Final publication, 2022. <https://www.tosynfuel.eu/wp-content/uploads/2022/09/TO-SYN-FUEL-Final-Publication.pdf>
21. Oasmaa A., Elliott D.C., Müller S. Quality Control in Fast Pyrolysis Bio-Oil Production and Use // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2009, v. 28, N 3, p. 404-409. <https://doi.org/10.1002/ep.10382>
22. Kass M., Abdullah Z., Biddy M. et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. Report by Oak Ridge National Laboratory, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
23. Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Rol ridkykh biopalyv u dekarbonizatsii transportnoho sektoru [Role of biofuels in transport sector decarbonization.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 46, № 4 (2024), P. 82-90. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>
24. Drahnev S.V., Zheliezna T.A., Haidai O.I. Perspektyvy vykorystannia alternatyvnykh palyv na vodnomu transporti [Prospect for the use of biofuels in waterborne transport.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 45, № 1 (2023), P. 55-63. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>
25. Klimenko V.M., Bashtovyi A.I., Zubenko V.I., Antoshchuk T.O. Doslidzhennia shvydkoho pirolizu biomasy v abliatsiinomu shnekovomu reaktori [Research of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor.]. Industrial Heat Engineering. – V. 38, № 2 (2016), P. 48-55. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.06>

Отримано 06.12.2025

Received 06.12.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

УДК 662.767

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ БІОМЕТАНУВАННЯ IN-SITU НА ЗБІЛЬШЕННЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ В КЛАСИЧНИХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

Домбровський О.Г.¹, канд. екон. наук, Тракслер І.С.², канд. техн. наук, Потапова М.В.³, канд. техн. наук

¹ПрАТ «МХП Еко Енерджі», директор, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua

²Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, старший науковий співробітник, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514

³ПрАТ «МХП Еко Енерджі», консультант, maryana.potapova2@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9689-3912

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.11>

У статті досліджується та аналізується вплив процесу біометанування водню in-situ на підвищення виробництва метану в класичних біогазових установках. Розглянуто механізми гідрогенотрофного метаногенезу, гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу, які забезпечують біоконверсію CO_2 і H_2 у метан; вплив різних параметрів (температура, парціальний тиск водню, співвідношення CO_2 / H_2) на біохімічні шляхи перетворення CO_2 і H_2 у метан, а також на різноманітність та домінування різних груп бактерій в анаеробних реакторах. Впровадження технологій біометанування водню in-situ підтримує принципи циркулярної економіки та сприяє сталому розвитку. Подальші дослідження сприятимуть оптимізації даних технологій їх широкій інтеграції в діючі біогазові установки.

The article investigates and analyzes the impact of the in-situ hydrogen biomethanation process on increasing methane production in classical biogas plants. The mechanisms of hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis and acetoclastic methanogenesis, which ensure the bioconversion of CO_2 and H_2 into methane, are considered; the influence of various parameters (temperature, hydrogen partial pressure, CO_2 / H_2 ratio) on the biochemical pathways of CO_2 and H_2 conversion into methane, as well as on the diversity and dominance of different groups of bacteria in anaerobic reactors. The implementation of in-situ hydrogen biomethanation technologies supports the principles of a circular economy and promotes sustainable development. Further research will contribute to the optimization of these technologies and their broad integration into operating biogas plants.

Бібл. 22, рис. 2.

Ключові слова: біометанування водню in-situ, гідрогенотрофний метаногенез, гомоацетогенез, співвідношення CO_2 / H_2 , парціальний тиск водню.

1 Анаеробне зброджування та важливість очищення біогазу для ефективного використання

Анаеробне зброджування — це біохімічний процес, під час якого органічна речовина розкладається з утворенням біогазу через чотири послідовні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. Біогаз, що утворюється, має теплотворну здатність 20–25 МДж/м³ завдяки вмісту метану і є важливим джерелом відновлюваної енергії. Технологія анаеробного зброджування (АЗ) широко застосовується для переробки органічних відходів і виробництва біоенергії. У зв'язку з проблемами нестачі енергії та забрудненням навколишнього середовища, що викликане використанням викопного палива, біогазова промисловість швидко розвивається [1]. У 2023 році виробництво біогазу в Європі склало приблизно 17,1 млрд м³, а потужність виробництва електроенергії з біогазових установок у світі досягла приблизно 25 ГВт у 2022 році. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) повідомило про збільшення потужності на 3,4 ГВт (приблизно на 16%) з 2021 по

2022 рік. Європа, Китай і США є провідними регіонами з виробництва електроенергії з біогазу, причому на Європу припадає близько 70% світового виробництва [1, 2].

Європейський Союз поставив амбітну мету: до 2030 року виробляти 35 мільярдів кубометрів біометану щорічно в рамках плану REPowerEU [3].

Однак, для досягнення цього обсягу виникає питання забезпечення достатньої кількості органічної сировини для анаеробного зброджування. Одним із перспективних рішень є використання водню в процесі біотрансформації CO_2 та H_2 до метану [4].

В процесі анаеробного зброджування зазвичай використовують органічні відходи, такі як сільськогосподарські рештки, гній та харчові відходи. Проте, для досягнення цілі в 35 млрд кубометрів біометану, наявних ресурсів може бути недостатньо. За оцінками, у ЄС-27 є потенціал виробництва біометану до 41 млрд кубометрів до 2030 року, але це вимагає максимального ефективного використання всіх доступних ресурсів [5, 6].

Інтеграція водню в процес виробництва біометану може стати вирішенням проблеми дефіциту сировини. Процес метанування CO_2 за допомогою водню дозволяє перетворювати вуглекислий газ та водень на метан і воду. Це не лише підвищує вихід метану, але й сприяє зменшенню викидів CO_2 , що є важливим для досягнення кліматичних цілей.

Переваги технології:

- ефективність: додавання водню до процесу зброджування може збільшити виробництво метану без потреби в додатковій органічній сировині;
- сталий розвиток: використання відновлюваного водню в поєднанні з CO_2 сприяє циркулярній економіці та зменшенню парникових викидів;
- енергетична безпека: збільшення виробництва біометану з використанням водню може зменшити залежність від імпорту викопного палива.

Незважаючи на переваги, впровадження цієї технології потребує значних інвестицій та розвитку інфраструктури для виробництва та транспортування водню. Крім того, необхідно розробити нормативну базу та стандарти для інтеграції таких технологій в існуючі енергетичні системи [7].

Європейський Союз значно інвестує в розвиток технологій метанування в рамках програми Horizon 2020. Одним з прикладів є проєкт Biomethaverse спрямований на вдосконалення трансформації CO_2 та H_2 в метан і підвищення ефективності анаеробного зброджування. Інвестиції ЄС сприяють зміцненню енергетичної безпеки, зменшенню залежності від викопного палива та переходу до відновлюваної енергії [3].

Використання водню для біотрансформації CO_2 в метан є перспективним напрямом для досягнення цілей ЄС щодо виробництва біометану до 2030 року. Ця технологія може стати ключовим елементом у забезпеченні енергетичної безпеки та сталого розвитку, проте вимагає координації зусиль науковців, промисловості та урядів для її успішного впровадження.

2 Біометанування водню in-situ

Сьогодні для біологічного метанування застосовуються два основні підходи: метанування in-situ (введення H_2 безпосередньо в анаеробний реактор) та метанування ex-situ (здійснюється у спеціальному реакторі, який містить збагачені культури гідрогенотрофних метаногенів, куди вводять H_2 і CO_2 або H_2 та біогаз). In-situ метанування потребує менших інвестиційних витрат і може бути інтегроване у вже існуючі біогазові установки. Найпоширенішою конфігурацією реакторів для переробки промислових, побутових і міських відходів із

застосуванням in-situ технології біометанування є реактори безперервного перемішування (CSTR) [8, 9, 10, 11].

Крім збільшення концентрації метану в біогазі процес біометанування може стимулювати збільшення продуктивності вироблення метану.

Основні недоліки системи in situ є:

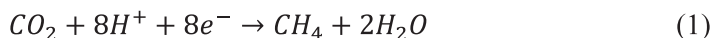
- накопичення проміжних продуктів за рахунок підвищеного парціального тиску H_2 (p_{H_2})
- підвищення pH через прогресуюче виснаження ендogenous розчиненого CO_2
- низька розчинність водню, яка може обмежувати однорідний та ефективний розподіл газу в рідкій фазі [9].

Виробництво CH_4 , що стимулюється введенням водню, тісно пов'язане з механізмами споживання H_2 в процесі анаеробного зброджування (АЗ). Цей процес складається з чотирьох основних стадій: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез та метаногенез. На перших трьох етапах утворюються H_2 і CO_2 , а також накопичується ацетат. Завершальна стадія, метаногенез, забезпечує синтез CH_4 із H_2 і CO_2 через два основні шляхи за участі трьох груп мікроорганізмів (рис. 1):

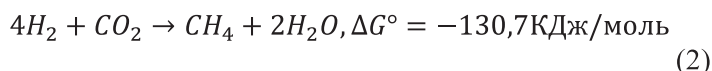
- гідрогенотрофних метаногенів (ГМ, Етап I);
- ацетокластичних метаногенів (АМ, Етап III), асоційованих із гомоацетогенами (ГА, Етап II) [12, 13].

Тобто якщо розглядати in situ біоконверсію CO_2 в CH_4 за рахунок лише наявної мікробіоти в реакторі, то існують такі шляхи біоперетворення: прямий гідрогенотрофний метаногенез, непрямий шлях через утворення гомоацетогенного ацетату з подальшим ацетокластичним метаногенезом, форміатний цикл та шлях прямого переносу електронів (ППЕ) [1].

Шлях ППЕ відбувається на біокатоді мікробної електрохімічної системи через так званий електрометаногенний процес, у якому метаногени отримують електрони безпосередньо з біокатода через фізичний контакт з електродом (рівняння 1) [1].



Пряме перетворення вуглекислого газу в метан здійснюється гідрогенотрофними метаногенами, які використовують 4 моля H_2 як донор електронів і 1 моль CO_2 як джерело вуглецю та акцептор електронів для отримання 1 молю CH_4 через так званий цикл Вульфа (рис. 2 А), який спрощено можна записати через реакцію Сабатьє (рівняння 2). Цей механізм є найбільш вивченим шляхом in-situ модернізації біогазу [1, 8, 14].



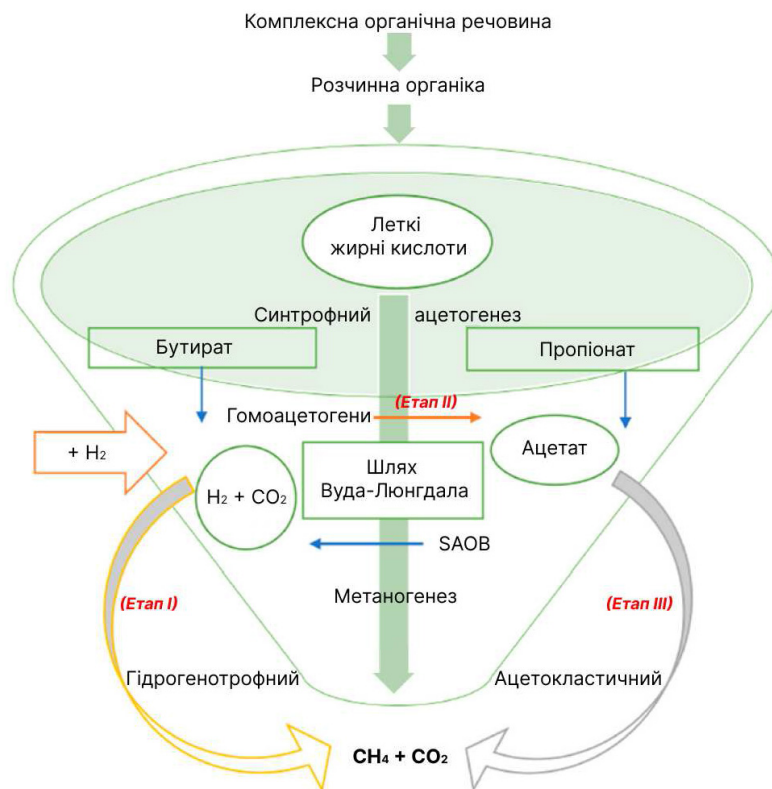


Рис. 1. Етапи анаеробного зброджування: метаболічні шляхи метаногенезу за участю водню [12, 13]

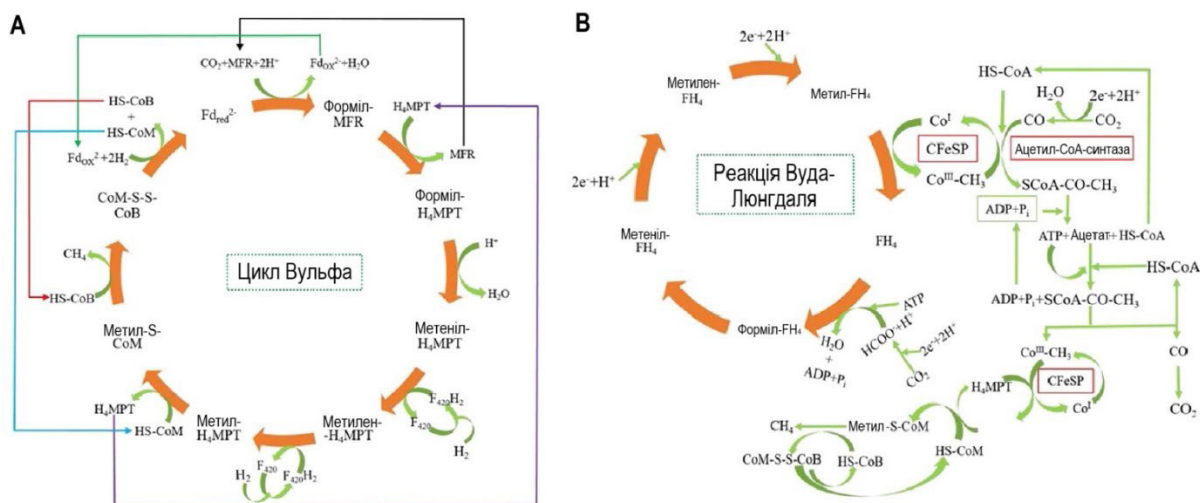


Рис. 2. (А) Цикл Вульфа відновлення CO_2 до CH_4 (В) Реакція Вуда-Люнгдала виробництва гомоацетогенного ацетату та розщеплення ацетату до CH_4 та CO_2 [1]



H_2 відіграє ключову роль у всьому процесі анаеробного зброджування. Екзогенне додавання H_2 призводить до зростання популяції як гідрогенотрофних метаногенів, так і гомоацетогенів, які утворюють оцтову кислоту з H_2 та CO_2 [13].

Однак недоліком додавання H_2 у процес АЗ є інгібування синтрофних ацетогенів, які беруть участь у деградації пропіонату та бутирату, а також синтрофних ацетатокислювальних бактерій (SAOB – syntrophic acetate-oxidizing bacteria). Важливо контролювати концентрацію H_2 для забезпечення рівноваги біохімічних реакцій (рис. 1.) [12, 13].

З біохімічної точки зору, непрямий шлях біоконверсії CO_2 в CH_4 (етапи гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу) потребує більше енергії, ніж гідрогенотрофний метаногенез, через синергію гомоацетогенів та ацетокластичних метаногенів, для підтримання клітинного метаболізму та зростання клітин. У результаті майже весь H_2 , утворений на етапі ацетогенезу, перетворюється на CH_4 через етап І (гідрогенотрофний метаногенез).

Дослідження демонструють, що додавання екзогенного CO_2 може суттєво змінити шляхи перетворення ацетату на CH_4 . Оскільки як CO_2 , так і H_2 є проміжними продуктами у виробництві CH_4 , введення H_2 потенційно може впливати на подальші шляхи утворення CH_4 , що відкриває велике поле для досліджень [12, 15].

У [9, 12] зазначається, що приблизно 40% поданого H_2 зазвичай споживається через процеси гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу.

Збагачення оцтової кислоти та метану ізотопом ^{13}C показало, що $61 \pm 3\%$ спожитого водню перетворювалося гомоацетогенами за концентрації CO_2 менше 7%. За цих умов спостерігалось підвищення рН до 8,33, що інгібувало ацетокластичних метаногенів і сприяло гомоацетогенезу. Підвищений тиск водню (>10 кПа) також інгібував активність метаногенів, тоді як за концентрації CO_2 понад 25% і тиску H_2 менше 10 кПа активність ацетокластичних метаногенів відновлювалася [16].

Ендогенний H_2 , утворений ацидогенними чи ацетогенними бактеріями, споживається гомоацетогенами або гідрогенотрофними метаногенами, підтримуючи низький парціальний тиск H_2 . Надмірний H_2 (>10 кПа) пригнічує гідролітичну та ферментативну активність у процесі АЗ. Проте цей ефект нівелюється завдяки розмноженню гідрогенотрофних бактерій, особливо за додавання CO_2 , що стимулює утилізацію H_2 та формування синтрофних зв'язків між ферментативними бактеріями та метаногенами [15].

ГМ мають обмежену здатність споживати H_2 . Навіть за конкуренції з ГА, споживання водню гідрогенотрофними метаногенами обмежене його кількістю в реакторі, тому інгібування шляхів споживання водню гомоацетогенами не є неефективним [12].

Біологічне виробництво H_2 у процесі АЗ не є стійким шляхом з огляду на ефективність енергетичної

рекуперації. Більше того, біологічне виробництво H_2 у процесі АЗ складно контролювати. З цієї точки зору, природна еволюція процесу АЗ до утворення CH_4 має бути переосмислена. У зв'язку з цим необхідно досліджувати екзогенні методи, зокрема подачу H_2 та CO_2 , для підвищення продуктивності утворення CH_4 [1, 12].

3 Вплив основних параметрів на біохімію процесу біометанування

На гідрогенотрофний, ацетокластичний метаногенез, гомоацетогенез, синтрофні взаємодії між різними групами метаногенів впливають і регулюють багато факторів, включаючи парціальний тиск H_2 , температуру, співвідношення CO_2 / H_2 , концентрація амонійного азоту та інші робочі параметри реактора. Ці всі параметри потребують ґрунтовних досліджень для можливості керування та оптимізації процесу біометанування водню.

3.1 Співвідношення CO_2 / H_2

Відповідно до реакції біометанування (рівняння 1), водень слід вводити в молярному співвідношенні 4 з бажаним споживанням вуглекислого газу. Однак точна оцінка потреби у водні вимагає оновлених сучасних знань про фонове виробництво вуглекислого газу, яке неможливо спостерігати безпосередньо, також подача водню в діючий анаеробний реактор може змінити продуктивність метаногенезу [17].

Водень використовується не тільки для метаногенезу, а й для росту клітин гідрогенотрофних архей отже, співвідношення CO_2 / H_2 , яке зазвичай використовується в in-situ та ex-situ технологіях біометанування, 1 / 4 недостатнє для повного перетворення водню та вуглекислого газу на метан, якщо таке завдання ставиться [15].

Для вивчення впливу подачі водню до працюючого анаеробного реактора на ланцюг органічного розпаду, у дослідженні [9] запропонували новий підхід, реалізований у напівперіодичних біореакторах, що полягає у поступовому збільшенні дози H_2 для акліматизації та розвитку спеціалізованої біомаси. В літературі є інші дослідження, які зосереджуються на покращенні якості біогазу в процесі АЗ осаду стічних вод, зокрема на співвідношенні CO_2 / H_2 для оптимізації процесу. Важливо отримати глибші знання про вплив співвідношення CO_2 / H_2 на формування консорціуму бактерій і архей, здатних стабільно максимізувати процес біометанування водню та CO_2 , а також розклад органічних субстратів [9].

Оскільки, як було сказано вище, для споживання 1 молю CO_2 потрібно 4 молі H_2 , то зазвичай в дослідженнях використовують стехіометричне співвідношення CO_2 / H_2 близько до 1 / 4. Хоча в літературі неодноразово згадується, що подача водню в систему ззовні стимулює перебудову біохімічних шляхів перетворення органічної речовини.

Наприклад у дослідженні [18] досягнуто зменшення CO_2 до 39% за допомогою H_2 , що становить 5% об'єму вільного простору, при гідравлічному часу утримання 21 день. Таким чином, для реактора об'ємом 1 літр із припущенням, що вільний простір становить 20%, буде потрібно 10 мл- H_2 /л, що менше, ніж у попередніх дослідженнях.

Проте перед масштабуванням до великого (комерційного) рівня важливо оптимізувати додавання H_2 для ефективного перетворення CO_2 та H_2 на біометан. Цей процес можна максимізувати, наприклад вводячи H_2 на початковому етапі налаштування АЗ органічних відходів [18].

3.2 Парціальний тиск водню

Парціальний тиск H_2 є надзвичайно чутливим фактором у процесі АЗ і зазвичай підтримується на низькому рівні в стабільному класичному процесі метаногенезу. Гідрогенотрофний метаногенез і гомоацетогенез можуть відбуватися лише при високому парціальному тиску H_2 (≥ 500 Па), тоді як синтрофне окислення ацетату з утворенням H_2 і CO_2 відбувається при низькому парціальному тиску H_2 [1, 12, 15, 19].

Тобто непрямий шлях конверсії CO_2 та H_2 в метан є більш сприятливим за високого парціального тиску H_2 , а також лужного рН. Якщо ж синтрофна взаємодія з ацетокластичними метаногенами відсутня, то надлишок водню в системі може потенційно інгібувати процес АЗ. Але за певних умов, ГА можуть випереджати ГМ у споживанні H_2 [8].

Оскільки анаеробні системи працюють близько до термодинамічної рівноваги, зміна концентрацій субстратів може змінити напрям процесів.

Кількість H_2 у системі визначає домінуючий шлях трансформації CO_2 та ацетату, а також вибірковість росту різних мікроорганізмів. Гідрогенотрофні метаногени домінують за низького H_2 , тоді як гомоацетогенні бактерії мають перевагу за високого H_2 . Ці взаємодії важливі для оптимізації біометанування залежно від концентрації H_2 у системі [20].

Введення H_2 у процес АЗ підвищує парціальний тиск H_2 , що впливає на активність мікроорганізмів, зокрема гомоацетогенів та змінює конверсію пропіонату й бутирату на ацетат. У таких умовах гомоацетогенез здатен споживати більшу кількість H_2 , сприяючи виробництву CH_4 через ацетокластичний метаногенез (Етап III, рис. 1). У стабільному АЗ при низькому парціальному тиску H_2 роль ГА у споживанні H_2 (2–5%) та у виробництві CH_4 через АМ є мінімальною. Основну частину H_2 (95–98%) споживають ГМ, які забезпечують близько 28% утворення CH_4 , тоді як 72% походить від АМ [12, 16, 19].

Можна чітко сказати, що здатність до метаногенезу залежить від концентрації H_2 , який є лімітуючим субстратом через низьку розчинність у воді. При високому парціальному тиску H_2 утворюється більше метану.

Ріст гідрогенотрофних метаногенів обмежується кількістю H_2 , що утворюється на етапах гідролізу та ацидогенезу. У процесі in-situ біометанування додавання H_2 може порушити цей баланс, що стимулює ріст ГМ, які споживають CO_2 , що утворюється на попередніх етапах. У результаті вихідний газ збагачується метаном, вміст якого може досягати 80–90% залежно від експериментальних умов.

АМ розкладають ацетат, утворюючи метан і CO_2 . В умовах підвищеного H_2 вони можуть втрачати конкурентну здатність через зсув рівноваги у бік утворення водню та CO_2 .

Синтрофні ацетат-окислювальні бактерії (SAOB) окиснюють ацетат у H_2 і CO_2 , якщо H_2 використовується іншими мікроорганізмами, такими як метаногени. Ці бактерії взаємодіють з гідрогенотрофними метаногенами, які конвертують H_2 і CO_2 безпосередньо в метан утворюючи циклічний метаногенез.

ГА та ГМ конкурують за H_2 і CO_2 . Метаногени зазвичай переважають при низьких концентраціях H_2 через кращу афінність (нижча K_s – константа напівнасичення). ГА можуть переважати при високому H_2 завдяки більшій гнучкості у використанні субстратів.

SAOB та ацетокластичні метаногени також конкурують за ацетат. У in-situ системах вони зазвичай мають близькі значення μ_{max} (максимальна питома швидкість росту) та K_s , що створює сильну конкуренцію [20].

З цього чітко видно, що оптимізація процесу in-situ біометанування вимагає поєднання високої ефективності процесу з підтримкою суворо синтрофних відносин всередині мікробних асоціацій реактора АЗ [8].

3.3 Температура

В термофільних умовах (55–60 °C) в середовищі реактора частіше домінують гідрогенотрофні метаногени, що пояснюється збільшенням швидкості росту з підвищенням температури від 33–35 до 55–60 °C. Відповідно, у мезофільних умовах (33–35 °C) зростає конкуренція між ГА та ГМ, тобто гомоацетогени краще пристосовані до нижчих температур і часто мають конкурентну перевагу [1, 15, 20].

Якщо розглянути три популяції мікроорганізмів: гомоацетогенів, ацетокластичних та гідрогенотрофних метаногенів, температура може бути найважливішим параметром, що впливає на частку певної популяції в консорціумі системи АЗ, оскільки гідрогенотрофні метаногени, здається, є єдиною популяцією, яка споживає H_2 та CO_2 при 55–60 °C.

Ацетокластичні метаногени мають нижчі швидкості росту за температури 35 °С, порівняно з ГМ та ГА. Але в системах анаеробного зброджування, особливо у процесах in-situ біометанування, АМ широко представлені у мікробних консорціумах завдяки етапам ацидогенезу та ацетогенезу, які постачають ацетат [20].

В дослідженні [21] було виявлено, що термофільний гідрогенотрофний метаноген був більш стійким до високих концентрацій аміаку порівняно з мезофільним гідрогенотрофним метаногеном.

За нижчих температур, які є типовими для процесів in-situ метанування, може виникати конкуренція, наприклад, із гомоацетогенами. Ймовірно, саме це є причиною, чому процеси ex-situ метанування забезпечують вищу частку метану в вихідному газі, до 98%, завдяки підвищенню робочої температури порівняно з системами in-situ біометанування [15, 20].

3.4 Амонійний азот

Рівень аміаку може впливати на шлях біоконверсії водню та CO_2 в CH_4 . Перехід від ацетокластичного шляху до гідрогенотрофного відбувався при підвищенні рівня аміаку (з 1 до 7 г $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{л}$) [1]. Тобто якщо порівнювати ацетокластичні метаногени з гідрогенотрофними, то останні були більш толерантними до інгібуючого ефекту аміаку [21].

В дослідженні [21] вихід метану при високій концентрації амонійного азоту в середовищі (7 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) був на 41,0% та 22,3% нижчим, ніж при низькій концентрації амонійного азоту (1 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) за мезофільних та термофільних умов відповідно.

При високій концентрації амонійного азоту (7 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) введення водню призвело до майже двохкратового збільшення кількості представників родин *Thermoanaerobacteraceae*, *Ruminococcaceae* та роду *Clostridium*. Ці результати свідчать про те, що додавання водню в реактор сприяє формуванню більш стійкого мікробного співтовариства, здатного протистояти високим концентраціям амонійного азоту порівняно зі звичайними процесами анаеробного зброджування. Результати показали, що процес виробництва та підвищення якості біогазу за допомогою водню може також позитивно впливати на стадії гідролізу та ацидогенезу під час анаеробного зброджування за умов високих концентрацій амонійного азоту.

Варто також зазначити, що ріст бактерій, чутливих до амонійного азоту (наприклад, *Halanaerobiaceae* та *Leucobacter*), був посилений введенням водню. Збільшення росту ГМ можна пояснити підвищеним метаболізмом SAOB за рахунок додаткового введення водню, оскільки гідрогенотрофні метаногени можуть споживати продукти SAOB і долати енергетичні бар'єри [22].

Висновки

1. Проведене дослідження доводить, що біометанування in-situ є ефективним методом підвищення вмісту метану в біогазі, виробленому на класичних біогазових установках.

2. Інтеграція водню в анаеробні процеси забезпечує ефективне перетворення водню та CO_2 на метан за допомогою гідрогенотрофного та непрямого метаногенезу, що сприяє підвищенню виходу біометану без додаткової потреби в органічній сировині.

3. Технології біометанування in-situ гарантують скорочення викидів CO_2 і забезпечує досягнення кліматичних цілей за рахунок використання відновлюваного водню та його інтеграції в існуючі системи виробництва біогазу.

4. Основними визначальними факторами ефективності процесу біометанування in-situ є:

- контроль парціального тиску водню;
- підтримка оптимального співвідношення H_2 і CO_2 ;
- уникнення інгібуючої дії на синтрофні бактерії та ацетокластичні метаногени.

5. Процес біометанування in-situ знижує капітальні витрати, усуваючи потребу в окремих реакторах для метанування, таким чином роблячи цю технологію доступною для встановлення на промислових і комунальних біогазових установках.

6. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації параметрів процесу біометанування in-situ, включаючи розподіл водню в реакторі, модифікацію складу мікробного консорціуму та вплив високих концентрацій H_2 і CO_2 на стабільність анаеробного зброджування.

Отримані результати сприяють розробці сталих біогазових технологій, які відповідають сучасним вимогам до екологічної та енергетичної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2020). In situ Biogas Upgrading by CO_2 -to- CH_4 Bioconversion. Trends in Biotechnology, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
2. Incorrrys Inc. (2023, September 19). Biogas power generation capacity 2010-2022. Data, Intelligence, and Forecasts for New Energy, Environment, and New Technology. <https://incorrrys.com/power-generationbiogas-power-generation/biogas-power-generation-capacity-2010-2022/>

3. Тракслер І.С. & Потапова М.В. (2024). Огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах України та Європи. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(4), 91-100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>
4. Гелету́ха Г.Г., Гивель М.М. & Кучерук П.П. (2024). Можливості виробництва передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок. Частина 1. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(4), 60-73. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>
5. Нове дослідження Gas for Climate | Потенціал виробництва біометану в ЄС | 2022. (n.d.). <https://uabio.org/materials/13559/>
6. Гелету́ха Г., Желізна Т., Кучерук П. & Драгнєв С. (2023). Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. *Теплофізика та теплоенергетика*, 49(2), 77-86 <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
7. *EBA Statistical Report 2023* | European Biogas Association. (n.d.). <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
8. Lembo, G., Rosa, S., Marone, A., & Signorini, A. (2023). In situ biogas upgrading in a randomly packed Gas-Stirred Tank reactor (GSTR). *Energies*, 16(7), 3296. <https://doi.org/10.3390/en16073296>
9. Corbellini, V., Feng, C., Bellucci, M., Catenacci, A., Stella, T., Espinoza-Tofalos, A., & Malpei, F. (2021). Performance Analysis and Microbial Community Evolution of In Situ Biological Biogas Upgrading with Increasing H₂/CO₂ Ratio. *Archaea*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8894455>
10. Крамар В. Технології збагачення біогазу та їх характеристики. (2023). *Теплофізика та теплоенергетика*, 48 (1), 64–74. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>
11. Домбровський О. Г., Тракслер І. С., & Потапова М. В. Біометанування водню in-situ: оптимізація виробництва біометану та очищення біогазу від CO₂. (2024). *Відновлювана Енергетика*, 3, 140–144. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\)140-144](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144)
12. Liu, R., Hao, X., & Wei, J. (2015). Function of homoacetogenesis on the heterotrophic methane production with exogenous H₂/CO₂ involved. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1196–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.081>
13. Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for Biogas upgrading to Biomethane: a review. *Bioengineering*, 6(4), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
14. Zhao, J., Li, Y., & Dong, R. (2021). Recent progress towards in-situ biogas upgrading technologies. *The Science of the Total Environment*, 800, 149667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149667>
15. Zhu, X., Zhou, P., Chen, Y., Liu, X., & Li, D. (2020). The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(6). <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02856-9>
16. Agneessens, L. M., Ottosen, L. D. M., Andersen, M., Olesen, C. B., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. (2018). Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresource Technology*, 258, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.102>
17. Poggio, D., Sastraatmaja, A., Walker, M., Michailos, S., Nimmo, W., & Pourkashanian, M. (2023). Experimental evaluation of continuous In-Situ biomethanation of CO₂ in anaerobic digesters fed on sewage sludge and food waste and the influence of hydrogen Gas–Liquid mass transfer. *Processes*, 11(2), 604. <https://doi.org/10.3390/pr11020604>
18. Okoro-Shekwaga, C. K., Ross, A., & Camargo-Valero, M. A. (2021). Enhancing bioenergy production from food waste by in situ biomethanation: Effect of the hydrogen injection point. *Food and Energy Security*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.288>
19. Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., & Angelidaki, I. (2022). H₂ competition between homoacetogenic bacteria and methanogenic archaea during biomethanation from a combined experimental-modelling approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107281>
20. Raftafi, Y., Laguillaumie, L., & Dumas, C. (2020). Biological Methanation of H₂ and CO₂ with Mixed Cultures: Current Advances, Hurdles and Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5259–5282. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01283-z>
21. Wang, H. (2016). Optimization of biomethanation focusing on high ammonia loaded processes. Welcome to DTU Research Database. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimization-of-biomethanation-focusing-on-high-ammonia-loaded-pr>
22. Wang, H., Zhu, X., Yan, Q., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2019). Microbial community response to ammonia levels in hydrogen assisted biogas production and upgrading process. *Bioresource Technology*, 296, 122276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122276>

RESEARCH ON THE IMPACT OF THE IN-SITU BIOMETHANIZATION PROCESS ON INCREASING BIOMETHANE PRODUCTION IN CLASSIC BIOGAS PLANTS

Dombrovskiy O.G.¹, PhD in Economics, **Traksler I.S.**², PhD in Technical Sciences, **Potapova M.V.**³, PhD in Technical Sciences

¹PrJSC "MHP Eco Energy", Director, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua

²Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514

³PrJSC "MHP Eco Energy", Consultant, maryana.potapova2@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9689-3912

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.11>

Objective: The study explores integrating in-situ hydrogen biomethanation into traditional biogas plants to enhance methane production. It aims to analyze biochemical mechanisms, assess the impact of operational parameters, and evaluate the feasibility of this technology for sustainable energy.

Tasks:

1. Investigate biochemical pathways—hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis, and acetoclastic methanogenesis—for converting CO₂ and H₂ into methane.
2. Examine how parameters such as temperature, hydrogen partial pressure, and the CO₂ / H₂ ratio influence methane production and microbial diversity.
3. Assessing the potential of in-situ biomethanation as a cost-effective and sustainable technology aligned with circular economy principles.

Methods:The research employed a comprehensive literature review to evaluate the integration of hydrogen biomethanation into continuous stirred tank reactors (CSTR). Key areas included gas-phase analysis, microbial dynamics, and thermodynamic modeling to evaluate methane production pathways and constraints.

Results: In-situ hydrogen biomethanation effectively enhances methane yields by leveraging hydrogenotrophic methanogens and homoacetogens. Hydrogen introduction facilitates CO₂ and H₂ conversion into methane via hydrogenotrophic pathways, with indirect contributions from homoacetogenic and acetoclastic processes.

Key findings include:

- **Parameter Optimization:** The CO₂ / H₂ ratio near 1:4 maximizes conversion rates.
- **Microbial Interactions:** High hydrogen levels support hydrogenotrophic methanogens but can inhibit syntrophic acetate oxidation, requiring precise control of hydrogen pressure.
- **Technology Integration:** In-situ biomethanation adapts to existing biogas plants with minimal changes, reducing organic feedstock reliance and improving biogas quality.

Conclusion

In-situ hydrogen biomethanation emerges as a promising technology for improving methane production in biogas plants while supporting renewable energy goals. Its integration aligns with the European Union's ambition to achieve 35 billion cubic meters of biomethane production annually by 2030. However, challenges such as hydrogen solubility limitations and the need for controlled operational conditions require further investigation. Continued research will focus on optimizing reactor configurations and scaling the technology for broader application.

References 22, Figures: 2.

Key words: In-situ hydrogen biomethanation, hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis, CO₂ / H₂ ratio, anaerobic digestion.

1. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2020). In situ Biogas Upgrading by CO₂-to-CH₄ Bioconversion. *Trends in Biotechnology*, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
2. *Incorrys Inc.* (2023, September 19). Biogas power generation capacity 2010-2022. Data, Intelligence, and Forecasts for New Energy, Environment, and New Technology. <https://incorrys.com/power-generation/biogas-power-generation/biogas-power-generation-capacity-2010-2022/>
3. Traksler, I., & Potapova, M. (2024). Review of green hydrogen transformation technologies for increasing biomethane production at existing plants in Ukraine and Europe. *Teplofizika ta teploenergetika*, 46(4), 91–100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10> (in Ukr.)
4. Geletukha, G., Hyvel, M., & Kucheruk, P. (2024). Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. *Teplofizika ta teploenergetika*, 46(4), 60–73. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7> (in Ukr.)
5. *New research Gas for Climate | Biomethane production potential in the EU | 2022.* (n.d.). <https://uabio.org/materials/13559/> (in Ukr.)

6. Geletukha, G., Zheliezna, T., Kucheruk, P., & Drahnev, S. (2023). Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy. *Teplofizika ta teploenergetika*, 49(2), 77–86. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9> (in Ukr.)
7. *EBA Statistical Report 2023* | European Biogas Association. (n.d.). <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
8. Lembo, G., Rosa, S., Marone, A., & Signorini, A. (2023). In situ biogas upgrading in a randomly packed Gas-Stirred Tank reactor (GSTR). *Energies*, 16(7), 3296. <https://doi.org/10.3390/en16073296>
9. Corbellini, V., Feng, C., Bellucci, M., Catenacci, A., Stella, T., Espinoza-Tofalos, A., & Malpei, F. (2021). Performance Analysis and Microbial Community Evolution of In Situ Biological Biogas Upgrading with Increasing H₂/CO₂ Ratio. *Archaea*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8894455>
10. Kramar V. Biogas enrichment technologies and their characteristics. (2023). *Teplofizika ta teploenergetika*, 48 (1), 64–74. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8> (in Ukr.)
11. Dombrovskiy O.G., Traksler I.S., & Potapova M.V. In-situ hydrogen biomethanization: optimization of biomethane production and biogas purification from CO₂. (2024). *Vidnovliuvana Enerhetyka*, 3, 140–144. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\)140-144](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144) (in Ukr.)
12. Liu, R., Hao, X., & Wei, J. (2015). Function of homoacetogenesis on the heterotrophic methane production with exogenous H₂/CO₂ involved. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1196–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.081>
13. Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for Biogas upgrading to Biomethane: a review. *Bioengineering*, 6(4), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
14. Zhao, J., Li, Y., & Dong, R. (2021). Recent progress towards in-situ biogas upgrading technologies. *The Science of the Total Environment*, 800, 149667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149667>
15. Zhu, X., Zhou, P., Chen, Y., Liu, X., & Li, D. (2020). The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(6). <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02856-9>
16. Agneessens, L. M., Ottosen, L. D. M., Andersen, M., Olesen, C. B., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. (2018). Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresource Technology*, 258, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.102>
17. Poggio, D., Sastraatmaja, A., Walker, M., Michailos, S., Nimmo, W., & Pourkashanian, M. (2023). Experimental evaluation of continuous In-Situ biomethanation of CO₂ in anaerobic digesters fed on sewage sludge and food waste and the influence of hydrogen Gas–Liquid mass transfer. *Processes*, 11(2), 604. <https://doi.org/10.3390/pr11020604>
18. Okoro-Shekwaga, C. K., Ross, A., & Camargo-Valero, M. A. (2021). Enhancing bioenergy production from food waste by in situ biomethanation: Effect of the hydrogen injection point. *Food and Energy Security*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.288>
19. Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., & Angelidaki, I. (2022). H₂ competition between homoacetogenic bacteria and methanogenic archaea during biomethanation from a combined experimental-modelling approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107281>
20. Rafrafi, Y., Laguillaumie, L., & Dumas, C. (2020). Biological Methanation of H₂ and CO₂ with Mixed Cultures: Current Advances, Hurdles and Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5259–5282. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01283-z>
21. Wang, H. (2016). Optimization of biomethanation focusing on high ammonia loaded processes. Welcome to DTU Research Database. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimization-of-biomethanation-focusing-on-high-ammonia-loaded-pr>
22. Wang, H., Zhu, X., Yan, Q., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2019). Microbial community response to ammonia levels in hydrogen assisted biogas production and upgrading process. *Bioresource Technology*, 296, 122276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122276>

Отримано 30.01.2025

Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025