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, № 3, 2025

Головний редактор – **Снєжкін Ю.Ф.**

Редакційна колегія:

Авраменко А.О. – заступник головного редактора
Басок Б.І.
Воробйов Л.Й.
Горобець В.Г.
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)
Міховскі М. (Болгарія)
Піоро І.Л. (Канада)
Сайред Н. (Великобританія)
Шевчук І.В. (Німеччина)

ЗМІСТ

Вітаємо ювіляра: КЛИМЕНКУ Віктору Миколайовичу виповнюється 90 років 5

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

Снєжкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Гусарова О.В., Малащук Н.С.

Статика, кінетика та енергоефективність процесу сушіння бананів до низької залишкової вологості 7

Авраменко А.О., Ковецька М.М., Анастасьєв Д.В., Олійник Л.В.

Граничні параметри детонації у газі Ван дер Ваальса ..20

Петрова Ж.О., Новікова Ю.П.

Дослідження впливу режимних параметрів та форми матеріалу при сушінні хурми (diospyros kaki l.) 30

Ободович О.М., Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П.

Дискретно-імпульсне введення енергії як альтернативний метод парового вибуху при переробці лігніновмісної сировини на біопаливо 42

Круковський П.Г., Ткач В.М.

Моделювання мікрохолодильників з ефектом Джоуля–Томсона 54

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

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

Забезпечення надійності димових труб сміттєспалювальних установок з системами утилізації скидної теплоти 62

Петраш В.Д., Баришев В.П., Шевченко Л.Ф., Голубенко А.В.

Енергетична ефективність комбінованого теплопостачання в умовах зростання парокомпресійної генерації теплоти 72

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Кліщ А.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Мартюк О.В.

Структура течії при спалюванні природного газу в пальниках з трирядною системою паливоподачі 83

Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Іваницький Г.К., Недбайло А.Є., Щепкін В.І.

Технології утилізації кислого конденсату димових газів. Попереднє очищення, декарбонізація та подальше використання 94

Домбровський О.Г.,Тракслер І.С., Деркач Є.А., Бондар А.В.

Інтеграція chlorella vulgaris в систему виробництва біометану: екологічні та технологічні аспекти 106

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS

THERMOPHYSICS AND THERMAL POWER ENGINEERING

UKRAINIAN SCIENTIFIC JOURNAL
Published quarterly

(Founded in1979, name until 2020 – «Industrial Heat Engineering»)

Volume 47, № 3, 2025

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:
A. Avramenko – Associated Editor
B. Basok
L. Vorobiov
V. Gorobec
V. Klimenko
P. Krukovsky
S. Kudrya
Ye. Pysmennyy
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: V.M. Klimenku is 90 years old. 5

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

Sniezhkin Yu., Dabizha N., Husarova O., Malashchuk N.

Statics, kinetics, and energy efficiency of the process of drying bananas to low residual moisture content 7

Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Anastasiev D.V., Oliinyk L.V.

limit of parameters during detonation in Van der Waals gas 20

Petrova Zh.O., Novikova Yu.P.

Study of the influence of operating parameters and material shape during drying of persimmon (diospyros kaki l.) 30

Obodovych O., Ivanytskyi G., Tselen B., Radchenko N., Gozhenko L.

Discrete-pulse energy input as alternative method of steam explosion for processing lignin-containing raw materials into biofuels 42

Krukovsky P.G., Tkach V.M.

Modeling of micro refrigerators with the JOLE–THOMSON effect 54

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

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

Ensuring reliable of chimneys waste incinerators with exhaust heat recovery systems. 62

Petrash V.D., Baryshev V.P., Shevchenko L.F., Golubenko A.V.

Energy efficiency of combined heat and power supply in the context of increasing steam compression heat generation 72

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

Fialko N.M., Sherenkovskyi Ju., Klishch A., Meranova N., Aloshko S., Martiuk O.
Flow structure during combustion of natural gas in burners with a three-row fuel supply system 83

Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Ivanytskyi G.K., Nedbailo A.E., Shchepkin V.I.
Technologies for utilization of acidic condensate from flue gases. Pre-treatment, decarbonization and subsequent use 94

Dombrovskiy O.H., Traksler I.S., Derkach Ye.A., Bondar A.V.
Fuel utilization and burning, heat power units, ecology integration of chlorella vulgaris into biomethane production systems: environmental and technological aspects 106

КЛИМЕНКУ Віктору Миколайовичу, головному науковому співробітнику відділу теплофізичних проблем систем теплопостачання Інституту технічної теплофізики НАН України, доктору технічних наук, члену-кореспонденту НАН України, Лауреату Державної премії України з науки і техніки
07 серпня 2025 р. виповнюється 90 років.

Віктор Миколайович Клименко - відомий вчений-теплофізик та теплоенергетик. З 1952 р. навчався на теплоенергетичному факультеті Київського політехнічного інституту, який закінчив з відзнакою у 1957 році за спеціальністю інженер-механік турбінобудування. З 1957 р. він працював інженером-конструктором на Південному турбінному заводі (м. Миколаїв), де брав участь у створенні перших газотурбінних двигунів для Військово-морського флоту СРСР.

У 1959 р. Клименко В.М. був прийнятий до аспірантури при кафедрі аерогідромеханіки та теплообміну Київського державного університету, де його науковим керівником став видатний український вчений і державний діяч академік НАН України Швець І.Т. Він і визначив весь наступний науковий і творчий шлях Віктора Миколайовича.

З 1959 р. Клименко В.М. працює в Інституті технічної теплофізики НАН України, пройшовши посадовий шлях від інженера до завідуючого відділом інституту, головного наукового співробітника. Клименко В.М. у 1983-1996 рр. був завідувачем лабораторії систем охолодження теплових двигунів, у 1996-2003 рр. керував відділом теплопровідності інституту. В період 2009 – 2018 рр. в ІТТФ НАН України працював на посаді головного наукового співробітника відділу теплофізичних проблем біоенергетики. В 2018 – 2021 рр. був завідувачем відділу теплофізичних проблем систем теплопостачання (ТПСТ). З 2021 р. - головний науковий співробітник лабораторії теплофізичних проблем біоенергетики відділу ТПСТ.

Головний напрямок наукової діяльності В.М. Клименка – фундаментальні дослідження в галузі теплофізики, теплообміну, теплопередачі; розробка теоретичних і експериментальних методів дослідження теплових процесів в газотурбінних двигунах; створення наукових основ комбінованого виробництва теплової та електричної енергії (когенераційних технологій) в різних галузях теплоенергетики. За матеріалами досліджень була підготовлена та у 1965 р. успішно захищена кандидатська дисертація, а в 1990 р. – докторська. В 1974 році Клименко В.М. отримав вчене звання старшого наукового співробітника за спеціальністю «Теплофізика», а в 1995 р. був обраний член-кореспондентом НАН України за спеціальністю «Теплоенергетика».

У 2003 р. з метою отримання досвіду співпраці з виробничим сектором України Клименко В.М. бере участь у створенні Інституту прикладних досліджень в енергетиці, в якому стає його першим директором. Після того як було налагоджене серійне впровадження когенераційних установок в Україні, він повертається до наукової діяльності в ІТТФ НАН України на посаду головного наукового співробітника.

На основі багаторічних досліджень процесів теплопередачі та гідродинаміки в натурних умовах роботи газотурбінних двигунів (ГТД) Клименко В.М. створив основи теорії робочого процесу систем теплового захисту деталей високотемпературних пристроїв і агрегатів, що були втілені в розроблених методах розрахунку та експериментального дослідження систем повітряного охолодження деталей турбін ГТД. Результати цих досліджень і розробок узагальнені в тритомній монографії «Расчетные и экспериментальные методы определения теплового состояния

основных узлов газовых турбин с воздушным охлаждением», одним із авторів якої є Клименко В.М. Ці результати досліджень і розроблені методи втілені на більшості підприємств газотурбобудування України. Клименко В.М. і його співробітники розробили, дослідили і випробували системи охолодження для переважної більшості енергетичних, авіаційних, транспортних, та газоперекачуючих ГТД, що виготовлялись в Україні. У 1986 р. за цикл робіт «Теоретичні основи та практичні методи створення систем теплового захисту високотемпературних двигунів та впровадження їх в енергетичному та транспортному машинобудуванні» Клименку В.М. в складі групи співробітників відділу було присуджено Державну премію України в галузі науки та техніки.

Разом із теоретичними дослідженнями особливе місце в науковій діяльності Клименка В.М. займала розробка методів та засобів експериментального дослідження теплових та гідравлічних характеристик систем охолодження в натурних умовах роботи ГТД. Створена ним унікальна вимірювальна апаратура, зокрема безконтактні струмоздіймачі і передавачі тиску, була на той час єдиним можливим засобом отримання інформації про температуру й тиск на роторних деталях багатовальних ГТД і тому знайшла застосування в експериментальних роботах ряду підприємств.

Велике значення для вирішення проблем енергозбереження і економії природного газу мають роботи Клименка В.М. по розробці методів і технологій комбінованого виробництва теплової і електричної енергії при модернізації теплових електростанцій України, підвищенню ефективності використання палива в житлово-комунальному секторі економіки за рахунок застосування когенераційно-теплонасосних установок. Ряд публікацій присвячені вирішенню паливних проблем за рахунок поєднання біоенергетичних і когенераційних технологій. Клименко В.М. запропонував новий підхід до реалізації ідей когенерації, що полягає в перетворенні існуючих теплогенеруючих об'єктів в комбіновані установки, які виробляють теплоту та електроенергію. Були вирішені теплофізичні, технічні та організаційні проблеми, пов'язані з реалізацією когенераційних проектів. Власні напрацювання і світовий досвід у вирішенні проблем, пов'язаних із створенням когенераційних установок різного типу і призначення, відображені у його тритомній монографії «Когенерационные системы с тепловыми двигателями». Велику увагу Клименко В.М. приділяв створенню законодавчої бази для розвитку вітчизняної теплоенергетики. Так, за його ініціативою та при безпосередній участі були створені Закони України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії» та «Про теплопостачання» (2005 р.).

З 2022 р. основним напрямом наукової діяльності Клименка В.М. є дослідження можливостей і шляхів розвитку в Україні біометанових технологій. Зокрема, розглядаються особливості технологій та питання економічної доцільності виробництва синтетичного відновлюваного метану шляхом метанування біогазу з використанням відновлюваної електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій, що є ефективним засобом декарбонізації промисловості та важливим рішенням щодо енергозбереження та підвищення гнучкості енергетичної системи.

Клименко В.М. займається також науково-педагогічною діяльністю: здійснював наукове керівництво здобувачами, які успішно захистили дисертації з наукового ступеню кандидата та доктора наук, був науковим керівником роботи аспірантів та читав їм лекції.

Клименко В.М. приймає активну участь в науково-організаційній діяльності, зокрема в різні роки був членом Бюро відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, членом національного комітету з тепломасообміну, членом експертної ради щодо Державних премій України (секція енергетики), членом спеціалізованої ради по захисту докторських дисертацій, членом Великої Ради всеукраїнського конкурсу «Лідер паливно-енергетичного комплексу», є членом редколегії журналу «Теплофізика та теплоенергетика».

Шановного Віктора Миколайовича щиро вітаємо з ювілеєм! Бажаємо нових наукових цілей та їх досягнень, невичерпної енергії для досліджень, міцного здоров'я, щасливого довгого життя і бадьорого настрою.

УДК 664.8.047

СТАТИКА, КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ БАНАНІВ ДО НИЗЬКОЇ ЗАЛИШКОВОЇ ВОЛОГОСТІ

Снєжкін Ю.Ф.[1], академік НАН України, **Дабіжа Н.О.**[2], канд. техн. наук.,
Гусарова О.В.[3], канд. техн. наук, **Малащук Н.С.**[4], PhD

[1]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: ittf_ntps@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9049-3392
[2]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: dabizha.nataliia@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6124-1981
[3]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056,
Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: o.v.husarova@nas.gov.ua, ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7622-9168
[4]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: malashchuk_n@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8648-1006

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.1

У статті досліджено процес сушіння бананів до низької залишкової вологості 6…7 % за різних режимів зневоднення та форми матеріалу. Рекомендовано, з метою прискорення процесу, вибирати недозрілі банани зі ступенями зрілості 2 та 3. Досліджено гігротермічний рівноважний стан (статика) та кінетика сушіння банану. Одержана залежність для визначення загальної тривалості процесу сушіння. Визначені залежності критерію оптимізації процесу сушіння та густини теплового потоку від вологовмісту банана. За даними щодо питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг води запропонований ступеневий режим сушіння банану за температур 100/60 ºС, як найбільш енергоефективний.

The article investigates the process of drying bananas to a low residual moisture content of 6…7% under different dehydration modes and material forms. To speed up the drying process, it is recommended to select unripe bananas with ripeness levels 2 and 3. The hygrothermal equilibrium condition (statics) and kinetics of banana drying were studied. The obtained dependence for determining the total duration of the drying process. The dependencies of the drying process optimization criterion and heat flux density on banana moisture content have been determined. Based on data on the specific heat consumption for evaporating 1 kg of water, a two-stage banana drying mode at temperatures of 100/60 °C was proposed as the most energy-efficient.

Бібл. 21, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: банан, сорбційні властивості, конвективне сушіння, ступеневі режими зневоднення, критерій оптимізації, питомі витрати тепла, енергоефективність.

d – вологовміст сушильного агента, г/кг с.п.;
N_{max} – максимальна швидкість сушіння, $с^{-1}$;
m – маса, кг;
p – парціальний тиск, мм рт. ст.;
q – питомі витрати теплоти, кДж/кг;
$q(\tau)$ – густина теплового потоку, $кВт/м^2$;
Rb – критерій оптимізації процесу сушіння;
t – температура, ºС;
u – вологовміст сировини, кг/кг с.м.;
v – швидкість руху сушильного агента, м/с;
W – відносна вологість сировини, %;
χ_i – відносні коефіцієнти сушіння;
τ – час, с.

Вступ

Банан є одним з найбільш розповсюджених та улюблених фруктів мільйонів споживачів по всьому світі. Це найважливіша сільськогосподарських культура після рису та пшениці [1, 2].

Банани становлять приблизно 15% від загального світового виробництва свіжих фруктів. Але, за оцінками [1], п’ята частина бананів щорічно відбраковується через неналежний зовнішній вигляд, через що вони не підлягають продажу. Все це призводить до втрати врожаю та збитків. Збитки та відходи виникають на всіх етапах виробництва, починаючи від збору врожаю і до отримання продукту споживачем.

Тому актуальним є пошук способів збереження та перероблення надлишкової сировини на продукти харчування з підвищеним терміном зберігання.

З бананів виготовляють пюре, макарони, енергетичні батончики, сухофрукти, чіпси, пластівці, борошно та порошки використовуючи при цьому різні методи перероблення [1-4].

Сушіння є методом консервування та подовження терміну зберігання продуктів шляхом зниження активності води. Сушіння запобігає розвитку мікроорганізмів, дозволяє дешевше транспортування та пакування, економить місце при зберіганні тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Характеристика бананів, як об'єкту сушіння

М'якоть є їстівною частиною харчових бананів. У стиглих бананах м'якоть становить 68…70% маси плоду, решта припадає на шкірку. М'якоть стиглих бананів залежно від ботанічного сорту має біле або світло-жовте забарвлення, ніжну консистенцію, прекрасний аромат і приємний солодкий смак. Високі смакові якості бананів, а також їх харчова цінність обумовлюються хімічним складом плодів.

Найважливішою складовою частиною бананів є цукри, вміст яких коливається від 16 до 20%. З цукрів у бананах переважають сахароза і фруктоза. Крім цукрів, у м'якоті стиглих бананів містяться в невеликій кількості крохмаль, органічні кислоти, пектинові, дубильні, мінеральні та ароматичні речовини, вітаміни і ферменти. Вміст вітаміну *С* в стиглих бананах становить в середньому 8…12 мг% [2, 5]. Вони багаті на калій та кальцій і мають низький вміст натрію, містять значну кількість антиоксидантних речовин (фенольні сполуки, вітамін *А*, вітаміни групи *В* та аскорбінова кислота) [2].

Аромат стиглих бананів залежить від наявності в м'якоті складних, мало вивчених ефірів.

У незрілих плодів шкірка має зелене забарвлення, майже не відділяється від м'якоті. М'якоть незрілих плодів не має характерного, властивого зрілим плодам аромату та має присмак свіжих огірків або гарбуза. Консистенція м'якоті тверда, смак терпкий. Тверда консистенція м'якоті незрілих бананів обумовлена присутністю нерозчинного протопектину, а терпкий смак – великою кількістю дубильних речовин. При згинанні незрілі банани ламаються, а не гнуться.

Високих споживчих та смакових якостей м'якоть бананів набуває тільки при нормальному дозріванні плодів в штучних умовах. Необхідність зняття плодів в незрілому вигляді пояснюється тим, що банани, які дозріли на рослині, не набувають належного смаку і аромату, втрачають поживні властивості, шкірка їх розтріскується, в результаті чого м'якоть легко пошкоджується хворобами і шкідниками.

Велике значення при дозріванні бананів мають процеси перетворення крохмалю в цукор. У результаті цих процесів поступово змінюються консистенція та смак м'якоті плодів.

Під час дозрівання бананів у шкірці та м'якоті плодів під впливом ферментів відбуваються складні перетворення речовин: нерозчинний протопектин переходить у водорозчинний пектин, а крохмаль – у цукор, змінюється колір шкірки та м'якоті, утворюються ароматичні речовини, відбувається низка інших складних змін хімічного складу плодів [1, 3-7].

Загалом існує 7 ступенів стиглості бананів. За даними джерел [1, 7], незрілі плоди бананів за зовнішнім виглядом, консистенцією м'якоті і хімічним складом, особливо за вмістом цукру і крохмалю, різко відрізняються від зрілих, таблиця 1.

У зелених плодах з вуглеводів переважає крохмаль, вміст якого коливається в залежності від сорту і району зростання в межах 18…20%; цукру в зелених плодах міститься незначна кількість.

Табл. 1. Зміни вмісту вологи та хімічного складу бананів залежно від ступеня зрілості [1]
Table 1. Changes in moisture content and chemical composition of bananas depending on the degree of ripeness

Стадія стиглості	Волога (%)	Загальні цукри (г/100 г)	Крохмаль (г/100 г)	Лимонна к-та (г/100 г)	Яблучна к-та (г/100 г)	Зола (г/100 г)	Калій (мг/100 г)	Магній (мг/100 г)
1	76.1	1.26	2.80	2.34	2.24	4.20	421.81	36.26
2	76.7	2.69	1.50	2.27	2.17	4.08	501.88	40.32
3	77.3	4.01	1.64	2.19	2.10	4.07	528.36	40.90
4	78.3	3.99	1.59	2.24	2.14	3.83	565.15	48.78
5	79.3	5.17	1.76	2.01	1.92	3.40	583.74	57.66
6	82.6	5.37	1.66	1.65	1.58	3.31	630.04	58.75
7	86.2	12.28	0.91	1.48	1.41	3.17	708.81	59.45

У міру дозрівання співвідношення крохмалю і цукру різко змінюється. Як видно з таблиці 1, кількість крохмалю скорочується у 3 рази, а цукру збільшується в 10 разів. Кількість золи зменшується, а вміст калію та магнію значно зростає, що покращує поживну цінність. Відносно висока кислотність у стадіях 1 – 3 надає легку кислинку м'якоті, може гальмувати ферментацію, зберігати колір та покращувати смак. На стадіях 5 – 7 кислотність зменшується, що може погіршити зберігання.

Відомо також, що вміст вітаміну С в процесі дозрівання плодів змінюється незначно.

Аналіз сучасних методів сушіння

Існує велика кількість публікацій присвячених процесу сушіння бананів. Переважна більшість досліджень спрямовані на покращення процесу шляхом зменшення енерговитрат, підвищення ефективності сушіння, мінімізації небажаного впливу на органолептичні та харчові властивості, а також отримання високоякісної продукції з мінімальними капіталовкладеннями.

Для сушіння фруктів, зокрема і бананів використовуються традиційні методи зневоднення: сонячне, конвективне, кондуктивне, мікрохвильове, вакуумне, ультразвукове, розпилювальне, осмотичне, псевдозрідження та сублімаційне [2, 4, 7-13].

Такі методи зневоднення мають свої переваги та недоліки. До основних переваг відносять простоту, дешевизну та надійність, до недоліків – значні енерговитрати, тривалість процесу та погіршення якості готового продукту.

Останнім часом увага науковців спрямована на дослідженні методів сушіння фруктів, в т. ч. бананів, з комбінованим енергопідведенням. Відомі дослідження ІЧ-випромінювання та конвективного, вакуум-мікрохвильового, ІЧ та вакуумного, сублімаційно-конвективного, конвективно-конденсаційного сушіння тощо [2, 7, 8, 10, 12-15]. Такі методи забезпечують якість харчових продуктів та є більш ефективними порівняно з традиційними. Комбінування методів сушіння дозволяє поєднати сильні сторони різних способів і сприяє підвищенню енергоефективності процесу та якості продуктів.

Інноваційні технології сушіння урізноманіт-нюють якісні показники продуктів (надаючи їм певний вигляд, структуру чи характеристики), мінімізують втрати продуктів харчування та забезпечують кращий економічний ефект для виробників.

Узагальнення науково-технічних даних показує, що підвищення температури сушильного агента пришвидшує зневоднення, однак занадто високі температури викликають потемніння, втрату аромату та поживних речовин, особливо у термочутливих плодах. У випадку бананів, висока температура активує ферменти та карамелізацію цукрів, що призводить до потемніння та зниження товарної якості продукту. Помірні температури (60 °С) забезпечують збереження якості, але процес триває занадто довго [2, 7, 15]. Попередня обробка може давати як позитивний так і негативний ефект, тому потрібні додаткові дослідження впливу різних видів обробки на процес сушіння та органолептичні характеристики продукту [16].

З огляду на вищенаведене, можна зробити висновок, що банани – складний об'єкт для сушіння.

Високий вміст вологи (76…86%), значні зміни у хімічному складі під час дозрівання приводять до того, що текстура бананів суттєво змінюється: м'якоть стає м'якшою, що ускладнює нарізання і сушіння рівними скибками. Такі фізико-хімічні особливості потребують ретельного вибору ступеня зрілості для отримання якісного сушеного продукту. Тип методу сушіння та попередня обробка також впливають на фізико-хімічні та харчові властивості банановых продуктів [2, 4, 7, 15, 16].

Мета досліджень

Метою роботи є дослідження статики та кінетики конвективного сушіння м'якоті бананів до низької залишкової вологості, визначення енергетичних характеристик процесу та розроблення енергоефективного режиму зневоднення.

Матеріали і методи досліджень

Нами було встановлено, що значний вплив на процес сушіння справляє ступінь зрілості бананів і вміст в них цукрів. При збільшенні вмісту цукру тривалість процесу сушіння збільшується в 3 рази [18, 19].

З метою прискорення процесу необхідно вибирати недозрілі банани зі ступенями зрілості 2 та 3. Банани мають нижчу вологість та помірну кислотність, що прискорює зневоднення та зменшує енергетичні витрати на процес. У таких бананів тверда м'якоть, їх легко нарізати. Високий вміст крохмалю та низький вміст цукру забезпечать хрустку структуру, зменшення потемніння та липкості. Помірна кислотність сприятиме кращому збереженню смаку та кольору.

Банани ступенем 5 – 7 не рекомендовані для сушіння на чіпси і краще підходять для інших видів переробки, наприклад, на пюре [1, 6, 7].

Для проведення досліджень в місцевій торгівельній мережі були придбані банани зі ступенем зрілості 2…3 і початковою відносною вологістю 75…80%. Очищені

від шкірки банани нарізали кубиками 5×5×5 мм і пелюстками завтовшки 5…6 мм та довжиною 65…75 мм. Кубики бананів сушили насипним шаром 60×60×10 мм, пелюстки – в одиничному шарі. Процес проводили до досягнення матеріалом низької вологості 6…7%.

Вміст вологи в матеріалі визначали за ДСТУ 7804:2015 шляхом сушіння зразків в бюксах до постійної маси в сушильній шафі з температурою 100…105 ºС фіксуючи масу бюкси з навішенням до висушування m_1, масу бюкси з навішенням після висушування m_2, масу пустої бюкси m_0.

При вирішенні задач, що пов'язані зі змінюванням кількості вологи в матеріалі в процесі його сушіння, в розрахунках швидкості сушіння, критерію оптимізації та густини теплових потоків використовували вологовміст u – відношення маси вологи $m_в$ до маси сухого матеріалу $m_{с.м.}$, кг/кг с.м.:

$$u = \frac{m_в}{m_{с.м.}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \quad (1)$$

При вирішенні задач, що пов'язані з порівнянням зразків з однаковою масою, при розрахунках маси сухого матеріалу використовували відносну вологість W – відношення маси вологи $m_в$ до маси вологого матеріалу m, %:

$$W = \frac{m_в}{m} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (2)$$

Статика процесу сушіння вивчає взаємодію вологого матеріалу з повітрям незалежно від часу, в результаті якої він наближається до гігротермічного рівноважного стану. Дослідження гігротермічного рівноважного стану банану проводилися з застосуванням тензометричного (статичного) методу Ван Бамелена [20]. Згідно методу зразки висушеного матеріалу в бюксах витримують в ексикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти. При певній температурі та концентрації сірчаної кислоти в ексикаторі встановлюється парціальний тиск пари p, що відповідає цій концентрації та відносному тиску p/p_s. Відносна вологість повітря визначається як $\varphi = p/p_s \cdot 100\%$. Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0.001 г до моменту досягнення ними постійної маси, що свідчить про настання стану рівноваги при даній температурі й відносній вологості повітря. Рівноважний вологовміст матеріалу u_p визначається як відношення маси вологи в матеріалі в рівноважному стані до маси сухого матеріалу.

Кінетика процесу сушіння вивчає змінювання середнього (інтегрального) вологовмісту і середньооб'ємної температури матеріалу в часі. Дослідження кінетики процесу зневоднення бананів з метою вивчення основних закономірностей тепломасопереносу проводили на експериментальному сушильному стенді.

Експериментальний стенд складається із системи ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції сушильного агента, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури сушильного агента, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу [12].

Стенд обладнаний автоматизованою системою збору та обробки інформації, що включає комп'ютер, цифрові ваги AD-500 та спеціально розроблену автоматизовану програму, канал вимірювання температури, що складається з аналогово-цифрового перетворювача та інтерфейсу. Аналогові сигнали з термоелектричних датчиків перетворювались АЦП (*i*-7018) в цифрову форму та за допомогою інтерфейсу (*i*-7520) передавались на комп'ютер [12].

Дослідження проводилися при швидкості сушильного агента 1.0 м/с, його вологовмісті 11 г/кг сухого повітря та при температурах 100, 80, 60, 100/60 °С.

За експериментальними даними будували криві кінетики сушіння $u = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $du/d\tau = f(u)$, що отримані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також температурні криві нагрівання матеріалу $t = f(\tau)$.

На основі експериментальних даних визначають тривалість процесу сушіння бананів за узагальненою кривою сушіння як функцією вологовмісту матеріалу від узагальненого часу $N\tau$ за формулою (3):

$$\tau_з = \frac{1}{N_{max}} \left(\frac{1}{\chi_2} lg \frac{u_п}{u_{кр1}} + \frac{1}{\chi_3} lg \frac{u_{кр1}}{u_{кр2}} + \frac{1}{\chi_4} lg \frac{u_{кр2}}{u_к} \right) \quad (3)$$

У формулі (3) величини критичних вологовмістів $u_{кр}$ і відносних коефіцієнтів χ знаходять із узагальненої кривої кінетики сушіння, що побудована в напівлогарифмічній системі координат [20].

Енергоефективність процесу сушіння характеризується такими основними показниками:

- енергетичною (тепловою) ефективністю η, яка визначається як співвідношення корисної теплоти, що необхідна на випаровування вологи, до загальної теплоти, що використовується на випаровування вологи та нагрівання вологого матеріалу;

- питомими витратами теплоти на випаровування 1 кг води q, кДж/кг.

Розрахунок енергетичних характеристик процесу – критерію оптимізації процесу сушіння та теплових

потоків на поверхні матеріалу – здійснювали за методикою, викладеною в [20].

За даними з кінетики вологообміну можливо встановити кінетику теплообміну під час сушіння банану. Зв'язок між теплообміном і вологообміном встановлюється за основним рівнянням кінетики процесу сушіння (4):

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q_N} = \left(\frac{du}{d\tau}\right)^* (1 + \mathrm{Rb}), \quad (4)$$

де q*(τ) – відносна густина теплового потоку; q(τ) – потік тепла в періоді падаючої швидкості сушіння, кВт/м^2; q_N – потік тепла за постійної (максимальної) швидкості сушіння, кВт/м^2; $\left(\frac{du}{d\tau}\right)^* = \frac{1}{N}\left(\frac{du}{d\tau}\right)$ – відносна швидкість сушіння; $N = \left(\frac{du}{d\tau}\right)_N$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається за постійної (максимальної) швидкості сушіння; Rb – критерій оптимізації, який характеризує співвідношення кількості теплоти, яка витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, яка витрачена на випаровування з нього вологи, за нескінченно малий проміжок часу.

Число Rb розраховується за формулою (5):

$$\mathrm{Rb} = \frac{c}{r}\left(\frac{dt}{du}\right), \quad (5)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг · К);
r – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг.

Змінювання густини теплового потоку $q_n(\tau)$ на поверхні матеріалу впродовж процесу сушіння, визначається за залежністю (6), кВт/м^2:

$$q_{\text{п}}(\tau) = q^*(\tau) \cdot q_N \quad (6)$$

Густина теплового потоку в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, визначається за (7):

$$q_N = r_N \frac{m_{a.c.}}{S}\left(\frac{du}{d\tau}\right)_N, \quad (7)$$

де $m_{a.c.}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, кг; S – площа поверхні вологого матеріалу, м^2.

Результати та їх обговорення

Дослідження сорбційних властивостей бананів

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма сорбції пари води паренхімними тканинами банана за температури середовища 20 °С в діапазоні відносних тисків p/p_s від 0.4 до 0.9 (рис. 1). Як видно з ізотерми сорбції, рівноважний вологовміст банана при p/p_s = 0.45 становить 0.07 кг/кг с.м. (6.5% відн), тому при виробництві продуктів з бананів із низькою вологістю, висушений матеріал необхідно упаковувати в герметичну тару для збереження заданих властивостей. При одержанні продуктів з бананів із проміжною вологістю для запобігання розвитку мікроорганізмів вологовміст банану не повинен перевищувати 0.20 кг/кг с.м. (16.7% відн.).

Для визначення оптимальних режимів сушіння необхідно знати параметри гігротермічного рівноважного стану матеріалу з повітрям за різних температур. Використовуючи метод характеристичних кривих, що заснований на потенційній теорії сорбції, за одержаною при t = 20 °С ізотермою сорбції визначили максимальний гігроскопічний вологовміст паренхімних тканин банана u_{os} = 1.109 кг/кг с.м. та розрахували значення рівноважних вологовмістів в діапазоні температур від 50 до 80 °С.

Слід зазначити, що ізотерми сорбції відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної вологи). У цій області парціальний тиск пари води над поверхнею матеріалу $p_{\text{м}}$ відрізняється від тиску насичення та залежить від вологовмісту і температури матеріалу (рис. 2): в міру зменшення вологовмісту і при зниженні температури $p_{\text{м}}$ зменшується, й при наближенні вологовмісту до 0.07 кг/кг с. м. таке зменшення стає суттєвим. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну Δp, яка визначається різницею між парціальним тиском пари води на поверхні матеріалу $p_{\text{м}}$ і тиском пари води в парогазовому потокові p_c.

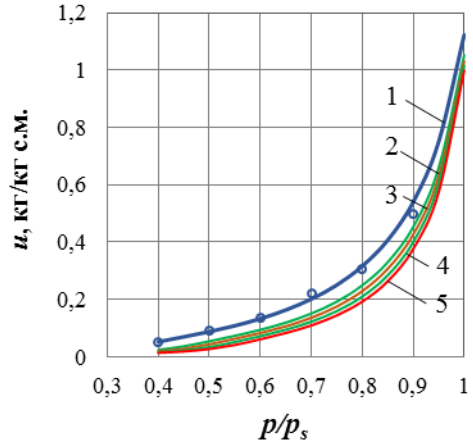


Рис. 1. Ізотерма адсорбції пари води паренхімними тканинами банана: 1 – t = 20 °С; 2 – t = 50 °С; 3 – t = 60 °С; 4 – t = 70 °С; 5 – t = 80 °С

Fig. 1. Isotherm of water vapour adsorption by banana parenchyma tissues: 1 – t = 20 °C; 2 – t = 50 °C; 3 – t = 60 °C; 4 – t = 70 °C; 5 – t = 80 °C

Таки чином, здійснення процесу конвективного сушіння банана на етапі досушування при низькій температурі до низького залишкового вологовмісту 6…7% в кліматичних умовах тропіків має певні труднощі, пов'язані з високим вологовмістом сушильного агента, який може змінюватися в межах від 25 до 32 г/кг с.п., парціальний тиск водяної пари відповідно буде змінюватися від 28 до 33 мм рт. ст. Суттєве зменшення масообмінного напору Δp між матеріалом і сушильним агентом в даному випадку призведе до зниження швидкості зневоднення, що значно подовжить тривалість процесу і збільшить енерговитрати.

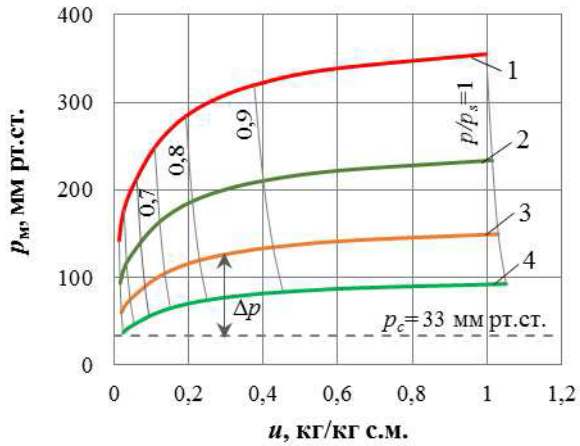


Рис. 2. Залежність парціального тиску пари води на поверхні банана від вологовмісту і температури: 1 – t = 50 °C; 2 – t = 60 °C; 3 – t = 70 °C; 4 – t = 80 °C

Fig. 2. Dependence of the partial pressure of water vapour on the banana surface on moisture content and temperature: 1 – t = 50 °C; 2 – t = 60 °C; 3 – t = 70 °C; 4 – t = 80 °C

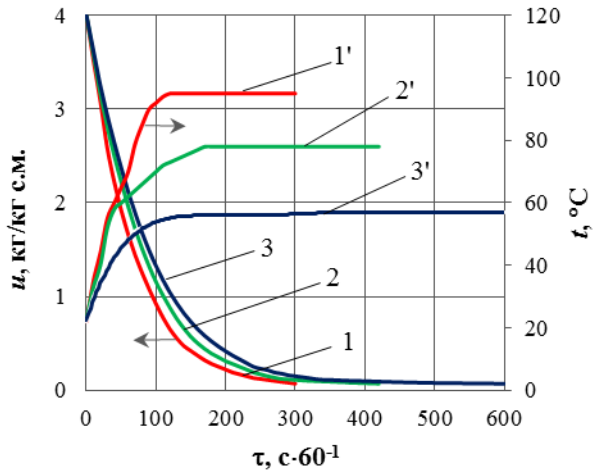


Рис. 3. Вплив температури сушильного агента на кінетику сушіння кубиків банану та змінювання температури на поверхні матеріалу: 1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Fig. 3. Effect of drying agent temperature on the drying kinetics of banana cubes and temperature changes on the surface of the material: 1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Дослідження кінетики сушіння бананів

Вплив температури сушильного агента на процес сушіння кубиків бананів у вигляді кривих сушіння та змінювання температури на поверхні матеріалу представлено на рисунку 3. З підвищенням температури сушильного агента з 60 до 100 °C тривалість процесу скорочується в два рази.

При підвищенні температури сушильного агента до 100 °C вже через 40…50 хв спостерігалось перевищення температури поверхневого шару бананів понад 75 °C. У цей момент спостерігалось потемніння поверхні бананів, а до кінця процесу сушіння банани ставали темнокоричневими.

При м'яких режимах сушіння (80 і 60 °C) температура поверхні бананів не перевищувала 75 та 58 °C, відповідно. До кінця сушіння шар бананів злегка потемнів, але зберігся приємний аромат і смак, що властиві вихідному банану. За температури сушильного агента 60 °C потемніння поверхні бананів пояснюється тривалістю процесу, ферментативною активністю та карамелізацією цукрів.

На рисунку 4 наведені криві швидкості сушіння кубиків бананів за різних температур сушильного агента.

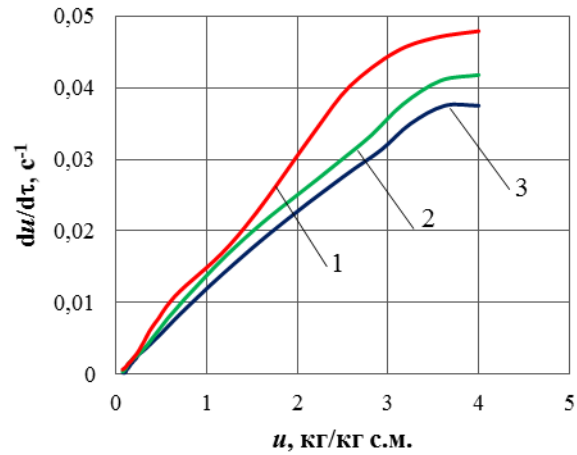


Рис. 4. Криві швидкості сушіння кубиків банану: 1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Fig. 4. Drying rate curves for banana cubes: 1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Аналізуючи криві швидкості сушіння, можна зробити висновок, що характер процесу сушіння бананів залежить від температури сушильного агента. При м'яких режимах (60 °С) спостерігається перший період сушіння. Якщо температура повітря підтримується на рівні 80…100 °С, то сушіння протікає в другому періоді, та відразу ж після прогрівання матеріалу спостерігається плавне зниження швидкості сушіння бананів.

Результати сушіння бананів нарізаних кубиками і пелюстками при ступеневому режимі 100/60 °С зображено на рисунку 5.

Як видно з температурних кривих (рис. 3), в початковий період сушіння банану висока температура сушильного агента не є критичною, оскільки температура на його поверхні не перевищує гранично допустимої. Виходячи з цього перехід з температури 100 °С на 60 °С відбувався через 40 хвилин від початку процесу при досягненні поверхнею матеріалу 65 °С.

У результаті при ступеневому режимі 100/60 °С температура матеріалу не перевищувала 60 °С, тому поверхня зразків залишалася світлою. При цьому, не спостерігалося обвуглювання торців матеріалу. Тривалість сушіння за ступеневим режимом скоротилася в 1,4 рази в порівняні з процесом за температури 60 °С.

Визначення тривалості сушіння

На рисунку 6 представлена узагальнена крива сушіння кубиків банану в шарі 60×60×10 мм.

За узагальненою кривою сушіння в напівлогарифмічних координатах визначені відносні коефіцієнти сушіння χ_1 і χ_2 :

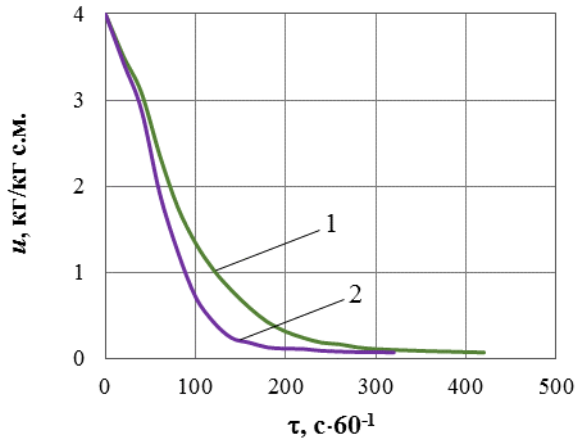


Рис. 5. Вплив форми матеріалу на кінетику сушіння банану при ступеневому режимі 100/60 °С: 1 – кубики, 2 – пелюстки

Fig. 5. Effect of material shape on the kinetics of banana drying in a step mode at 100/60 °C: 1 – cubes, 2 – petals

$\chi_1 = 0.0012$, $\chi_2 = 0.00021$.

Розв'язуючи рівняння (3), отримуємо розрахункову формулу для визначення тривалості процесу сушіння банана:

$$\tau = \frac{22.5}{N_{max}} \qquad (8)$$

Підставляючи в рівняння (8) значення максимальної швидкості сушіння N_{max}, можна заздалегідь оцінити тривалість процесу сушіння бананів при різних режимах зневоднення.

Дослідження тепломасообміну в процесі сушіння бананів

За даними щодо кінетики зневоднення (рис. 3) за формулою (5) було вирахувано змінювання критерію оптимізації Rb в процесі сушіння банану для різних температурних режимів (рис. 7).

Питому теплоємність банану при цьому розраховували за формулою (9) [21], кДж/кг·К:

$$c_p = 1.34 + 0.0262W \qquad (9)$$

Оскільки нагрівання матеріалу за своєю сутністю є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливого значення. Як видно з рис. 7, на початку процесу сушіння Rb має досить великі значення, що пов'язано з прогріванням матеріалу. У процесі сушіння Rb зменшується майже до нуля – теплота витрачається переважно на випаровування вологи з матеріалу, а не на його нагрівання. При досягнені матеріалом вологовмісту

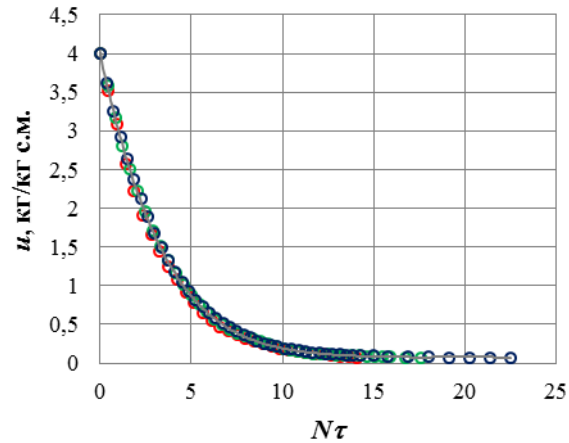


Рис. 6. Узагальнена крива кінетики сушіння кубиків банану в шарі

Fig. 6. Generalized curve of the drying kinetics of banana cubes in a layer

1.0 кг/кг с.м. Rb різко зростає, відбувається нагрівання матеріалу, що при температурах сушіння вищих за 60 ° призводить до погіршення органолептичних показників висушеного банану. З цього моменту доцільно знижувати температуру сушильного агента не лише для більш раціонального використання енергії, але й для позитивного впливу на якість готового продукту.

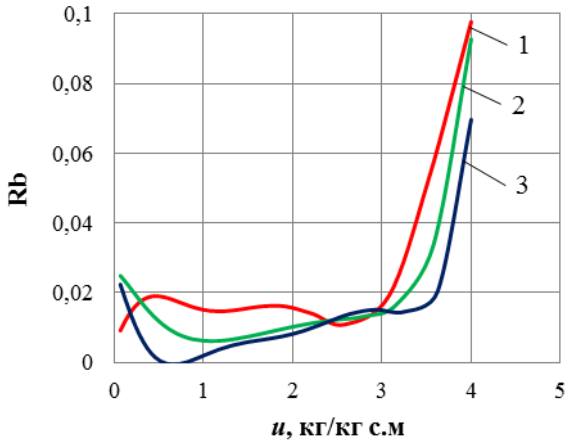


Рис. 7. Залежність критерію оптимізації Rb від вологовмісту банана в процесі сушіння за різних температур сушильного агента:
1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Fig. 7. Dependence of the optimization criterion Rb on the moisture content of the banana during the drying process at different temperatures of the drying agent:
1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

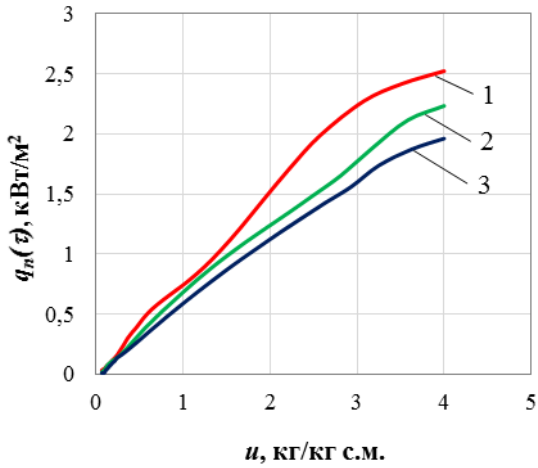


Рис. 8. Густина теплового потоку в залежності від вологовмісту банана в процесі сушіння за різних температур сушильного агента:
1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

Fig. 8. Heat flux density depending on the moisture content of the banana during drying at different temperatures of the drying agent:
1 – t = 100 °C; 2 – t = 80 °C; 3 – t = 60 °C

За одержаними даними щодо змінювання критерію оптимізації в процесі сушіння банану за формулою (6) розраховане змінювання густини теплового потоку за різних температур сушильного агента в залежності від вологовмісту (рис. 8). Як видно з графіків, зі зниженням вологовмісту банану теплові потоки на поверхні зменшуються, тобто на нагрівання вологого матеріалу та випаровування вологи потрібно менше теплоти. Це значить, що необхідно зменшити підведення енергії до сушильної камери задля більш раціонального її використання.

За даними з кінетики теплообміну (рис. 8) визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води під час сушіння кубиків банана в шарі за різних температур (рис. 9).

Як видно з рисунку 9, для здійснення ступеневого режиму за температур 100/60 °C необхідні найменші витрати теплоти. Енергетична (теплова) ефективність власне процесу сушіння для всіх режимів є високою η = 0.92…0.96. Тобто, більша кількість теплоти використовується на випаровування ніж на нагрівання, що очевидно з графіків залежності критерію оптимізації від вологовмісту (рис. 7). Низька енергетична ефективність конвективних сушарок обумовлена великими нераціональними втратами теплоти з повітрям, що йде, через стінки сушарки, а також на нагрівання конструкцій.

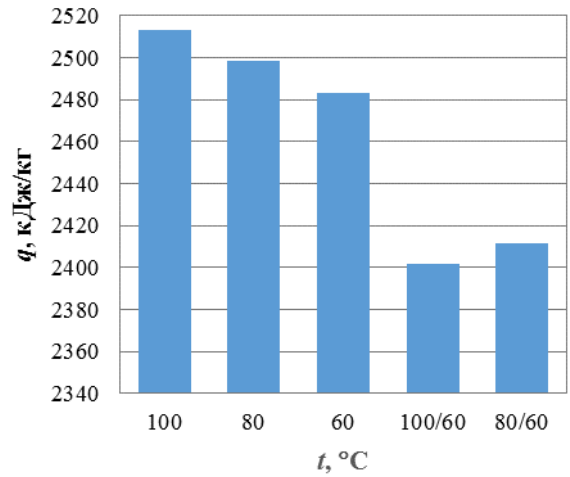


Рис. 9. Питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води за різних режимів сушіння кубиків банана в шарі

Fig. 9. Specific heat consumption for evaporation of 1 kg of water under different drying modes of banana cubes in a layer

Проведені комплексні дослідження дозволяють розробити енергоефективну технологію сушіння бананів до низької залишкової вологості для одержання чипсів високої якості, особливістю якої є проведення процесу зневоднення за ступеневим режимом за температур сушильного агента 100/60 ºС. Використання високої температури на першій стадії позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість.

Обмеження використання підвищеної темпе-ратури сушильного агента обумовлене гранично допустимою температурою нагріву матеріалу, яка під час сушіння банану в шарі за безперервного нагрівання не повинна перевищувати 60 ºС. Тому після досягнення матеріалом температури 50 ºС (температура на поверхні наближується до 60 ºС) необхідно знижувати температуру зневоднювання. Проте під час низькотемпературного сушіння до залишкового вологовмісту 0.06 кг/кг с.п. виявляється значний вплив вологовмісту сушильного агента на інтенсивність процесу. Як видно з рис. 2, у міру зменшення вологовмісту на поверхні матеріалу зменшується рушійна сила масообміну $\Delta p = p_м - p_с$. Тому під час досушування за температури 60 ºС необхідно враховувати цей фактор.

Використання сушених бананів

Натуральні чіпси, кубики, слайси, порошки з бананів можуть використовуватися у громадському харчуванні, в кондитерських, молочних і хлібобулочних виробах, де останнім часом спостерігається тенденція до використання натуральних смакових і ароматичних речовин та стабілізуючих систем.

Бананові чіпси (або слайси) – це натуральний продукт із тривалим терміном зберігання, що набуває популярності як функціональний харчовий інгредієнт. Їх використовують як самостійний перекус, десерт або компонент для сніданкових сумішей, випічки та кондитерських виробів. Завдяки зручному формату та збереженню природного смаку, такі чіпси є здоровою альтернативою смаженим закускам.

Як показує практика, порошки вдало поєднуються з іншими харчовими інгредієнтами, надають виробам певний колір, аромат, смак, підвищують їх поживну цінність, збагачують вітамінами, вуглеводами, органічними кислотами, мікроелементами, харчовими волокнами, біологічно активними речовинами. Використання натуральних порошків з бананів дозволяє зменшити додавання цукру в продукти, частково замінити в цих продуктах кислоти. Наявність пектину і клітковини, що мають значну гідрофільність та здатність до набухання й структуроутворення, дозволяє використовувати бананові порошки як стабілізатори.

Залежно від виду продукту та технологічних можливостей порошки вносяться в кількості від 2.0 до 30.0% як у сухому вигляді (борошняні, кондитерські вироби), так і попередньо відновлені, наприклад, в цукровому сиропі, молоці, сироватці (йогурти, сирні десерти, креми, морозиво).

Одержання та використання сушених продуктів із бананів сприяє зменшенню харчових втрат.

Висновки

За аналізом банану як об'єкту сушіння рекомендовано при виробництві чіпсів вибирати недозрілі плоди зі ступенями зрілості 2 та 3 для прискорення процесу зневоднення.

За результатами експериментальних дослі-джень з гігротермічної рівноваги (статики) за температури 20 ºС в діапазоні відносних тисків p/p_s від 0.4 до 0.9 методом характеристичних кривих одержанні ізотерми сорбції пари води бананом за температур від 20 до 80 ºС, що дозволяє визначити рівноважний вологовміст, який досягається при заданих тепловологісних параметрах повітря.

На підставі ізотерм сорбції для гігроскопічної області одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні банану від вологовмісту і температури в діапазоні u = 0.03...1.11 кг/кг с.м. і t = 50...80 ºС.

Експериментально досліджений вплив температури на кінетику процесу сушіння кубиків банану в шарі. Встановлено, що температура сушильного агента 100 ºС інтенсифікує процес зневоднення банана, але органолептичні показники матеріалу незадовільні.

На підставі досліджень кінетики вологообміну сушіння кубиків банану отримано формулу для розрахунку загальної тривалості процесу.

Одержані залежності критерію оптимізації та густини теплових потоків на поверхні матеріалу від вологовмісту банану в процесі сушіння за різних температур. За аналізом одержаних залежностей обґрунтована необхідність зниження температури на завершальній стадії та доведена доцільність використання ступеневих режимів зневоднення.

За даними з кінетики теплообміну визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води під час сушіння кубиків банана в шарі за різних температурних режимів. Встановлено, що найбільш енергоефектифним є ступеневий режим за температур сушильного агента 100/60 ºС.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Yap M.* et al. The effects of banana ripeness on quality indices for puree production // LWT - Food Science and Technology. 2017. Vol. 80. P. 10 – 18. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.073

2. *Sidonia Martínez, Andreina Roman-Chipantiza, Asma Boubertakh, Javier Carballo.* Banana Drying: A Review on Methods and Advances // Food Reviews International. 2023. 39 p. https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2262030

3. *Зберігання та пакування* плодоовочевої продукції: практичний посібник / Т. М. Приліпко, Т. В. Коваль. Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. 143 с.

4. *Muhammad Siddiq.* Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Tech-nology, and Nutrition. John Wiley & Sons Ltd. 2020. 284 p. https://doi.org/10.1002/9781119528265

5. *Santhosh Kumar Kookal, Appachanda Thimmaiah.* Nutritional Composition of Staple Food Bananas of Three Cultivars in India // American Journal of Plant Sciences. 2018. Vol. 9. No. 12. P. 2480 – 2493. https://doi.org/10.4236/ajps.2018.912179

6. *Adeyemi O.S., Oladiji A.T.* Compositional changes in banana (Musa ssp.) fruits during ripening // African Journal of Biotechnology. 2009. Vol. 8. Iss. 5. P. 858 – 859. ISSN: 16845315.

7. *Mendoza Fernando, Aguilera J.M.* Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas // Journal of Food Science. 2006. Vol. 69 (9). P. E471 – E477. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x

8. *Шапар Р., Гусарова О.* Аналіз інноваційних технологій для виробництва фруктових чипсів // Теплофізика та теплоенергетика. 2017. № 39 (3). С. 53 – 59. https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.08

9. *Шморгун В., Мартюк О.* Енергетична та екологічна ефективність випарування та сушіння рідких продуктів в одній випарувально-сушильній установці // Теплофізика та теплоенергетика. 2024. № 46 (1). С. 39 – 43. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.5

10. *Цвіркун Л. О., Омельченко О. В.* та ін. Дослідження та оптимізація процесів конвективного сушіння бананів // Обладнання та технології харчових виробництв. 2024. № 1 (48). С. 52 – 59. https://doi.org/10.33274/2079-4827-2024-48-1-52-59

11. *Гузик Д. В., Чередніков О. В.* та ін. Експериментальні дослідження процесів сушіння бананів // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2023. Вип. 45. С. 21 – 28.

12. *Снєжкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Гусарова О. В.* Інтенсивні методи сушіння шматочків яблук з конвекцією та комбінованим енергопостачанням // Теплофізика та теплоенергетика. 2024. Том 46 (4). С. 5 – 14. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1

13. *Arun S. Mujumdar, Anilkumar S.* Menon. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. New York: CRC Press. 2020. 30 p.

14. *Петрова Ж.О, Слободянюк К.С., Іванов С.О., Граков О. П.* Вплив комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів на енергетичні витрати // Теплофізика та теплоенергетика. 2023. Том 45 (2). С. 45 – 54. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.5

15. *Fabiano A.N. Fernandes, Sueli Rodrigues, Chung Lim Law, Arun S. Mujumdar.* Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review // Food and Bioprocess Technology. 2011. Vol. 4. P. 163 – 185. https://doi.org/10.1007/s11947-010-0323-7

16. *S. Tabtiang S. Prachayawarakon, Soponronnarit S.* Effects of Osmotic Treatment and Superheated Steam Puffing Temperature on Drying Characteristics and Texture Properties of Banana Slices // Drying Technology: An International Journal. 2021. Vol. 30 (1). P. 20 – 28. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.613554

17. *Macedo L. L., Araújo C., Souza Cruz D., Lima Pereira G., Saraiva S.* Applying vacuum pulse during ethanol pretreatment to enhance the drying rate and quality of fresh and osmo-dehydrated banana slices using coconut sugar // Food Research International. 2025. Vol. 208. P. 116115. ISSN 0963-9969. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116115

18. *Михайлик В.А., Снєжкін Ю.Ф., Корінчевська Т.В., Горніков Ю.* Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність яблучного та цукрового бурякового порошків // Теплофізика та теплоенергетика. 2017. Том 37 (5). С. 23 – 37. https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03

19. *Гусарова О.В., Дабіжа Н.О., Малащук Н.С. Дмитренко Н.В.* Особливості конвективного сушіння бананів // Збірник тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» 9 – 13 вересня 2024 р., Одеса. 2024. С. 11 – 13.

20. *Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О.* Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ: Сік Груп Україна. 2018. 228 с.

21. *Alvarado J. de D.* Specific heat of dehydrated pulps of fruits // Journal of Food Process Engineering. 1991. №14. P. 189 – 195. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00090.x

STATICS, KINETICS, AND ENERGY EFFICIENCY OF THE PROCESS OF DRYING BANANAS TO LOW RESIDUAL MOISTURE CONTENT

Sniezhkin Yu.[1], Dabizha N.[2], Husarova O.[3], Malashchuk N.[4]

[1]Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057

ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9049-3392, email: ittf_ntps@ukr.net

[2]PhD, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057

ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6124-1981, email: dabizha.nataliia@gmail.com

[3]PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyskyi Ave, 37, Kyiv, Ukraine, 03056

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057

ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7622-9168, email: o.v.husarova@nas.gov.ua

[4]PhD, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057

ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8648-1006, email: malashchuk_n@ukr.net

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.1

Bananas are the most important agricultural crop after rice and wheat. One-fifth of bananas are discarded annually due to their unsuitable appearance, which makes them unsuitable for sale. Finding ways to preserve and process surplus raw materials into food products with a longer shelf life is a pressing issue.

The purpose of the work is to study the statics and kinetics of convective drying of banana flesh to low residual moisture content, determine the energy characteristics of the process, and develop an energy-efficient dehydration mode.

Research methods. Bananas with ripeness levels of 2…3 and an initial relative humidity of 75…80% were selected for the study. The bananas were cut into 5×5×5 mm cubes and 5…6 mm thick and 65…75 mm long slices. The process was carried out until the material reached a low moisture content of 6…7%.

The hygrothermal equilibrium state of bananas was studied using the Van Bamel tensometric (static) method.

The study of the kinetics of bananas drying process was performed on an experimental convective stand with a system of automatic recording and processing of information at a drying agent temperature of 100, 80, 60, 100/60 ºC, speed 1.0 m/s, moisture content 11 g/kg dry air.

Based on experimental data, drying kinetics curves $u = f(\tau)$, drying rate curves $du/d\tau = f(u)$ obtained by numerical differentiation of drying curves, as well as material heating temperature curves $t = f(\tau)$ were constructed.

Results and conclusions. According to the results of experimental studies on hygrothermal equilibrium (statics) at a temperature of 20 °C in the range of relative pressures p/p_s from 0.4 to 0.9 using the characteristic curve method, the isotherms of water vapor sorption by bananas at temperatures from 20 to 80 °C were obtained, which allows determining the equilibrium moisture content that is achieved at given thermal and moisture parameters of the air.

Based on sorption isotherms for the hygroscopic region, the dependence of the partial pressure of water vapor on the surface of a banana on moisture content and temperature in the range u = 0.03…1.11 kg/kg dry weight and t = 50…80 °C was obtained.

The effect of temperature on the kinetics of the drying process of banana cubes in a layer was experimentally investigated. It was determined that a drying agent temperature of 100 °C intensifies the banana dehydration process, but the organoleptic indicators of the material are unsatisfactory.

Based on studies of the kinetics of moisture exchange during the drying of banana cubes, a formula for calculating the total duration of the process was obtained.

The obtained dependencies of the optimization criterion and the density of heat flows on the surface of the material on the moisture content of the banana during drying at different temperatures. Based on the analysis of the obtained dependencies, the necessity of reducing the temperature at the finishing stage is justified and the expediency of using stepwise dehydration modes is proved.

Based on heat transfer kinetics data, the specific heat consumption for evaporating 1 kg of water during the drying of banana cubes in a layer at different temperatures was determined. It was found that the most energy-efficient mode is the step mode at drying agent temperatures of 100/60 °C.

References 21, figures 9, tables 1.

Key words: banana, sorption properties, convective drying, staged dehydration modes, optimization criterion, specific heat consumption, energy efficiency.

1. *Yap M.* et al. The effects of banana ripeness on quality indices for puree production // LWT - Food Science and Technology. 2017. Vol. 80. P. 10 – 18. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.073

2. *Sidonia Martínez, Andreina Roman-Chipantiza, Asma Boubertakh, Javier Carballo.* Banana Drying: A Review on Methods and Advances // Food Reviews International. 2023. 39 p. https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2262030

3. *Zberihannia ta pakuvannia* plodoovochevoi produktsii: praktychnyi posibnyk [Storage and packaging of fruit and vegetable products: a practical guide] / T. M. Prylipko, T. V. Koval. Kamianets-Podilskyi: Zaklad vyshchoi osvity «Podilskyi derzhavnyi universytet», 2025. 143 p. (in Ukr).

4. *Muhammad Siddiq.* Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Tech-nology, and Nutrition. John Wiley & Sons Ltd. 2020. 284 p. https://doi.org/10.1002/9781119528265

5. *Santhosh Kumar Kookal, Appachanda Thimmaiah.* Nutritional Composition of Staple Food Bananas of Three Cultivars in India // American Journal of Plant Sciences. 2018. Vol. 9. No. 12. P. 2480 – 2493. https://doi.org/10.4236/ajps.2018.912179

6. *Adeyemi O.S., Oladiji A.T.* Compositional changes in banana (Musa ssp.) fruits during ripening // African Journal of Biotechnology. 2009. Vol. 8. Iss. 5. P. 858 – 859. ISSN: 16845315.

7. *Mendoza Fernando, Aguilera J.M.* Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas // Journal of Food Science. 2006. Vol. 69 (9). P. E471 – E477. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x

8. *Shapar R., Husarova O.* Analiz innovatsiinykh tekhnolohii dlia vyrobnytstva fruktovykh chypsiv [Analysis of innovative technologies for the production of fruit chips] // Teplofizyka ta teploenerhetyka. 2017. No. 39 (3). P. 53 – 59. https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.08. (in Ukr)

9. *Shmorhun V., Martiuk O.* Enerhetychna ta ekolohichna efektyvnist vyparuvannia ta sushinnia ridkykh produktiv v odnii vyparuvalno-sushylnii ustanovi [Energy and environmental efficiency of evaporation and drying of liquid products in a single evaporation and drying unit] // Teplofizyka ta teploenerhetyka. P. 39 – 43. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.5. (in Ukr)

10. *Tsvirkun L. O., Omelchenko O. V.* ta in. Doslidzhennia ta optymizatsiia protsesiv konvektyvnoho sushinnia bananiv [Research and optimization of convective drying processes for bananas] // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv 2024. No. 1 (48). P. 52 – 59. https://doi.org/10.33274/2079-4827-2024-48-1-52-59 . (in Ukr)

11. *Huzyk D. V., Cherednikova O. V.* et al. Eksperymentalni doslidzhennia protsesiv sushinnia bananiv [Experimental studies of banana drying processes] // Ventyliatsiia, osvitlennia ta teplohazopostachannia. 2023. Vol. 45. P. 21 – 28. (in Ukr)

12. *Sniezhkin Yu. F., Paziuk V. M., Husarova O. V.* Intensyvni metody sushinnia shmatochkiv yabluk z konvektsiieiu ta kombinovanym enerhopostachanniam [Intensive methods of drying apple slices with convection and combined energy supply] // Teplofizyka ta teploenerhetyka. 2024. Vol. 46 (4). P. 5 – 14. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1. (in Ukr)

13. *Arun S. Mujumdar, Anilkumar S.* Menon. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. New York: CRC Press. 2020. 30 p.

14. *Petrova Zh.O, Slobodianiuk K.S., Ivanov S.O., Hrakov O. P.* Vplyv kombinovanoho sushinnia koloidnykh kapiliarnoporystykh materialiv na enerhetychni vytraty [The effect of combined drying of colloidal capillary-porous materials on energy consumption] // Teplofizyka ta teploenerhetyka. 2023. Vol. 45 (2). P. 45 – 54. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.5. (in Ukr)

15. *Fabiano A.N. Fernandes, Sueli Rodrigues, Chung Lim Law, Arun S. Mujumdar.* Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review // Food and Bioprocess Technology. 2011. Vol. 4. P. 163 – 185. https://doi.org/10.1007/s11947-010-0323-7

16. *S. Tabtiang S. Prachayawarakon, Soponronnarit S.* Effects of Osmotic Treatment and Superheated Steam Puffing Temperature on Drying Characteristics and Texture Properties of Banana Slices // Drying Technology: An International Journal. 2021. Vol. 30 (1). P. 20 – 28. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.613554

17. *Macedo L. L., Araújo C., Souza Cruz D., Lima Pereira G., Saraiva S.* Applying vacuum pulse during ethanol pretreatment to enhance the drying rate and quality of fresh and osmo-dehydrated banana slices using coconut sugar // Food Research International. 2025. Vol. 208. P. 116115. ISSN 0963-9969. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116115

18. *Mykhailyk V. A., Sniezhkin Yu. F., Korinchevska T. V., Hornikov Yu.* Vplyv rezhymu konvektyvnoho sushinnia na krystalichnist yabluchnoho ta tsukrovoho buriakovoho poroshkiv // Teplofizyka ta teploenerhetyka [The effect of convective drying on the crystallinity of apple and sugar beet powders]. 2017. Vol. 37 (5). P. 23 – 37. https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03. (in Ukr)

19. *Husarova O.V., Dabizha N.O., Malashchuk N.S. Dmytrenko N.V.* Osoblyvosti konvektyvnoho sushinnia bananiv [Features of convective drying of bananas] // Zbirnyk tez dopovidei XX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia kharchovykh ta khimichnykh vyrobnytstv» 9 – 13 september 2024, Odesa. 2024. P. 11 – 13. (in Ukr)

20. *Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.* Teplomasoobminni tekhnolohii pererobky pektynovmisnoi syro-vyny: monohrafiia [Heat and mass transfer technologies for processing pitch-containing raw materials]. NAN Ukrainy, In-t tekhnichnoi teplofizyky. Kyiv: SIK HRUP Ukraina, 2018. 228 p. ISBN 978-617-7457-69-4 (in Ukr).

21. *Alvarado J. de D.* Specific heat of dehydrated pulps of fruits // Journal of Food Process Engineering. 1991. № 14. P. 189 – 195. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00090.x

Отримано 06.07.2025
Received 06.07.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 532.536

ГРАНИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДЕТОНАЦІЇ У ГАЗІ ВАН ДЕР ВААЛЬСА

Авраменко А.О.[1], член-кореспондент НАН України, **Ковецька М.М.**[2], канд. техн. наук, **Анастасьєв Д.В.**[3], аспірант, **Олійник Л.В.**[4]

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

[1]*професор, завідувач відділу, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2416-3512*
[2]*провідний наук. співр., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8455-4689, e-mail kovetskamargarita@ukr.net*
[3]*аспірант, dmytro.anastasiev@gmail.com*
[4]*науковий співробітник*

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.2

У роботі представлені результати аналізу динаміки течії реального газу через детонаційну хвилю. Показано вплив тепловиділення та термодинамічних властивостей газу Ван дер Ваальса на параметри процесу детонації.

The paper presents the results of an analysis of the dynamics of real gas flow through a detonation wave. The influence of heat release and thermodynamic properties of van der Waals gas on the parameters of the detonation process is shown.

Бібл. 21, рис. 1

Ключові слова: Теплообмін, газ Ван дер Ваальса, детонація, ударна хвиля.

a – швидкість звуку;
c_p – теплоємність при постійному тиску;
c_v – теплоємність при постійному об'ємі;
h – ентальпія;
k – показник ізоентропи;
p – тиск;
q – тепловий потік;
Δ – кут;
$\Re$ – універсальна газова постійна;
T – температура;
V – швидкість;
ρ – густина.

Індекси:
1 – параметри до ударної хвилі;
2 – параметри після ударної хвилі.

Вивчення граничних параметрів процесу детонації в реальних газах необхідне для проектування камер згоряння детонаційних двигунів [1], оцінки безпеки наслідків вибухів [2]. У роботі [3] досліджуються граничні параметри існування детонації у сумішах газів. Проаналізовано вплив вихідного складу газу на ефективність придушення детонації. Результати визначення діапазону значень фізичних параметрів існування нормальної сферичної детонації представлені у роботі [4]. Методом чисельного моделювання встановлено діапазон допустимих значень температури, чисел Маха та питомого вмісту водню у газовій суміші для існування детонації. Враховувалися критичні значення параметрів, пов'язаних із кінетикою хімічних реакцій на фронті вибухової хвилі. У роботі [5] представлені результати чисельного моделювання визначення параметрів детонації деяких вибухових речовин цивільного та подвійного призначення. Критичні параметри детонації синтетичного палива для детонаційних двигунів досліджено у роботі [6]. Показано роль хімічного складу палива у появі детонації. Вплив джерела тепла та турбулентності на розвиток процесу детонації у двигунах внутрішнього згоряння досліджено у роботі [7]. Дана оцінка впливу дифузії тепла на процес детонації сумішей водню та повітря.

При моделюванні процесу детонації в умовах високого тиску необхідно враховувати рівняння стану реального газу, вплив тепловиділення на детонаційну хвилю. У роботі [8] проаналізовано стійкість ударних хвиль у газі Ван дер Ваальса, показано вплив тепловиділення на стійкість ударної хвилі. Вплив параметрів реального газу на критичні умови ініціювання детонації в нестаціонарному потоці розглянуто в [9]. Даний простий метод оцінки впливу властивостей реального газу на ініціювання детонації в умовах високого тиску. Показано, що параметр a у рівнянні Ван дер Ваальса, що характеризує міжмолекулярне тяжіння, ускладнює ініціювання детонації, а параметр b, що характеризує

вплив кінцевого молекулярного об'єму, призводить до більш легкого ініціювання детонації. В роботі [10] представлені результати дослідження аномальних хвиль у динаміці детонації неідеального газу. Моделювання течії за допомогою рівняння стану неідеального газу впливає на швидкість звуку, швидкість хвилі та швидкість реакції. Показано вплив неідеальних параметрів рівняння стану Ван дер Ваальса на швидкість реакції та швидкість хвилі.

У роботі [11] досліджено вплив властивостей реального газу на стійку детонацію у суміші водню з повітрям за підвищеного тиску. Показано, що неідеальне рівняння стану та відповідні термодинамічні функції збільшують швидкість Чепмена-Жуге, але знижують температуру після удару порівняно з моделлю ідеального газу. Результати дослідження поширення ударних хвиль у не ідеальному газі представлені у роботах [12,13]. Показано вплив параметрів рівняння стану газу Ван дер Ваальса на інтенсивність тепломасообмінних процесів під час проходження фронту ударної хвилі. В роботі [14] представлені результати теоретичного дослідження динаміки газових детонацій. Проведено асимптотичний аналіз фізичних механізмів, що управляють модифікаціями внутрішньої структури детонації. Дослідження динаміки детонаційних хвиль реальних газів сприяють кращому розумінню фізики процесу детонації та розробці засобів управління процесом детонації.

Метою роботи є теоретичне дослідження процесу детонації в газі Ван-дер-Ваальса, визначення впливу рівняння стану газу на параметри детонації та порівняння результатів для реального та ідеального газу.

Стаціонарний потік газу описується такою системою рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії [14]

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

$$\rho V \frac{dV}{dx} = -\frac{dp}{dx}, \tag{2}$$

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

Розглянемо проходження потоку реального газу через ударну хвилю. Різка зміна параметрів течії під час проходження через ударну хвилю сприймається як розрив цих параметрів (до і після ударної хвилі). Функціональна залежність параметрів течії перед ударною хвилею або хвилею горіння (детонація) та за ударною хвилею в одновимірному потоці рідини називається умовами Ренкіна-Гюгоніо, або умовами стрибка параметрів потоку при проходженні ударної хвилі [15–17]. В результаті поєднання рівнянь (1) і (2), рівняння (1) і (3), а потім їх інтегрування, отримуємо систему рівнянь Ренкіна-Гюгоніо у вигляді

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \ , \tag{4}$$

$$p_1 + \rho_1 V_1^2 = p_2 + \rho_2 V_2^2 \ , \tag{5}$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{V_2^2}{2} . \tag{6}$$

Тут q визначає енергію, що відводиться ($q < 0$) або що виділяється ($q > 0$) на одиницю маси в результаті відповідного процесу, що відбувається при проходженні ударної хвилі. Система рівнянь (4) – (6) замикається рівнянням стану газу Ван дер Ваальса

$$\left(p + \frac{\alpha}{v^2}\right)(v - \beta) = \left(p + \alpha\rho^2\right)\left(\frac{1}{\rho} - \beta\right) = \Re T \ , \tag{7}$$

де α і β – константи Ван дер Ваальса, $v = 1/\rho$ – питомий об’єм. Параметр α характеризує додатковий тиск, а параметр β характеризує додатковий об’єм простору, що не заповнений молекулами. Використовуючи рівняння (7), можна отримати співвідношення для ентальпії

$$h = c_v T - \alpha\rho + \frac{p}{\rho} = \frac{c_v}{\Re}\left(p + \alpha\rho^2\right)\left(\frac{1}{\rho} - \beta\right) - \alpha\rho + \frac{p}{\rho}, \tag{8}$$

Тепер закон збереження повної ентальпії (6) з урахуванням рівняння (8) можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} &\frac{c_v}{\Re}\left(p_1 + \alpha\rho_1^2\right)\left(\frac{1}{\rho_1} - \beta\right) + \frac{V_1^2}{2} - \alpha\rho_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + q = \\ &\frac{c_v}{\Re}\left(p_2 + \alpha\rho_2^2\right)\left(\frac{1}{\rho_2} - \beta\right) + \frac{V_2^2}{2} - \alpha\rho_2 + \frac{p_2}{\rho_2} . \end{aligned} \tag{9}$$

У роботі [18] отримано модифіковане детонаційне рівняння Гюгоніо, яке враховує інтенсивність тепловиділення на характеристики детонації газу Ван дер Ваальса у вигляді

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{\left(\left(1+2A\left(1-B\right)-2B\right)k+1\right)\frac{\rho_2}{\rho_1}-\left(k-1\right)+2Ak\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2\left(B\frac{\rho_2}{\rho_1}-1\right)+Q\frac{\rho_2}{\rho_1}\left(k-1\right)}{\left(k+1\right)-\left(k\left(2B+1\right)-1\right)\frac{\rho_2}{\rho_1}}. \tag{10}$$

де

$$A=\frac{\alpha\rho_1^2}{p_1},\qquad B=\rho_1\beta, \tag{11}$$

$$Q=2q\frac{\rho_1}{p_1}=2kq\frac{\rho_1}{kp_1}=2\frac{kq}{a_1^2}, \tag{12}$$

$$k=c_p/c_\upsilon \tag{13}$$

Тут k – показник ізоентропічного розширення. У безрозмірній формі це рівняння запишеться у вигляді

$$P=\frac{\sigma\left(A\left(1-B\right)-B\right)+\gamma-R^{-1}+\sigma AR\left(BR-1\right)+Q}{\gamma R^{-1}-1-\sigma B}, \tag{14}$$

де

$$P=\frac{p_2}{p_1},\qquad R=\frac{\rho_2}{\rho_1},\qquad \gamma=\frac{k+1}{k-1},\qquad \sigma=\frac{2k}{k-1}. \tag{15}$$

Рівняння (10) та (14) описують модифіковане рівняння Гюгоніо для детонації з урахуванням теплофізичних властивостей газу Ван дер Ваальса та тепловиділення. Для ідеального газу (A=B=0) та потоку без підведення енергії рівняння (14) зводиться до

$$P=\frac{\gamma-R^{-1}}{\gamma R^{-1}-1}=\frac{\gamma-S}{\gamma S-1}, \tag{16}$$

що є добре відомою адіабатою Гюгоніо для ідеальних газів [19]. Тут $R^{-1}=S$.

Рівняння (14) має асимптоту для граничного збільшення густини ρ_2/ρ_1 при проходженні ударної хвилі, виражену як

$$R=\frac{\gamma}{1+\frac{2k}{k-1}B}=\frac{\gamma}{1+\sigma B}. \tag{17}$$

Для умови, що визначається формулою (17) стрибок тиску (14) стає нескінченним. Для ідеального газу (A=B=0) рівняння (17) для стрибка густини зводиться до залежності

$$R=\gamma. \tag{18}$$

Щоб визначити якій точці на кривій Гюгоніо відповідає стійка нормальна детонація з мінімальною швидкістю скористаємося правилом відбору Жуге [20,21] (рис.1). Ця точка відповідає точці на кривій Гюгоніо D, через яку проходить дотична, яка також проходить через точку $\left(P,S\right)=\left(1,1\right)$.

На рис.1 пунктиром позначена ізентропа Пуассона P=S-k. Рівняння дотичної визначається такою умовою [20,21]

$$\frac{P-1}{1-S}=\frac{dP}{dS}. \tag{19}$$

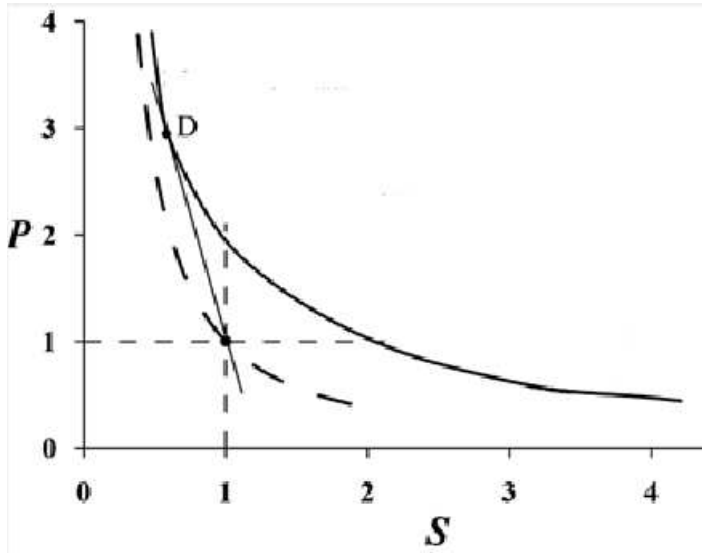


Рис. 1. Правило відбору Жуге

Fig. 1. Jouguet selection rule.

Із (14) знаходимо

$$\frac{P-1}{1-S}=\frac{dP}{dS}=\frac{1+\gamma P+\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}. \tag{20}$$

Визначимо тангенс кута нахилу цієї дотичної. Для цього знаходимо з рівнянь (4) та (5)

$$V_1=\sqrt{\frac{p_2-p_1}{\rho_2-\rho_1}\frac{\rho_2}{\rho_1}}=\sqrt{\frac{P-1}{1-S}\frac{p_1}{\rho_1}}, \tag{21}$$

$$V_2=\sqrt{\frac{p_2-p_1}{\rho_2-\rho_1}\frac{\rho_1}{\rho_2}}=S\sqrt{\frac{P-1}{1-S}\frac{p_1}{\rho_1}}. \tag{22}$$

З рівняння (21) знаходимо тангенс кута дотичної в точці D

$$\tan(\delta)=-\frac{P_D-1}{1-S_D}=-k\mathrm{Ma}_1^2. \tag{23}$$

З іншого боку, цей самий тангенс визначається рівнянням (20)

$$\tan(\delta)=\left(\frac{dP}{dS}\right)_D=\frac{1+\gamma P_D+\sigma A\dfrac{2B-S_D}{S_D^3}}{1-\gamma S_D+\sigma B}=-k\mathrm{Ma}_1^2. \tag{24}$$

Рішення системи рівнянь (23) та (24) дозволяють знайти координати точки D на кривій Гюгоніо. Виключаючи P_D з (24) на основі (23), отримаємо поліноміальне рівняння четвертого порядку

$$\mathrm{Ma}_1^2(k+1)S_D^4-\left(1+k\mathrm{Ma}_1^2(B+1)\right)S_D^3+AS_D-2AB=0\,. \tag{25}$$

З рівняння (25) знаходимо S_D, а потім на основі (23) величину P_D. Рівняння для S_D і P_D дуже громіздкі і тому не наводяться. Для ідеального газу ($A = B = 0$) рівняння для S_D та P_D переходять у відомі співвідношення Жуге [20,21]

$$P_D=\frac{1+k\mathrm{Ma}_1^2}{1+k}, \tag{26}$$

$$S_D=\frac{1+k\mathrm{Ma}_1^2}{(1+k)\mathrm{Ma}_1^2}\,. \tag{27}$$

Граничне рівняння для S_D при швидкості, що прагне нескінченності

$$R_D=\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)_D=\frac{1+k}{k(1+B)}\,. \tag{28}$$

Це рівняння визначає граничний стиск у детонації, якій відповідає умові Жуге. Для ідеального газу ($B = 0$) рівняння (28) перетворюється на рівняння Жуге [20,21]. Як видно, вплив параметра B на граничне стиснення при детонації якісно таке ж, як і на асимптоту граничного стиснення для не реагуючого газу (17). Також граничний стиск при детонації не залежить від параметра A.

Визначимо швидкість продуктів детонації. Для цього перетворюємо рівняння (20) наступним чином

$$\frac{P-1}{1-S}=\frac{1+\gamma P+\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}=\frac{1+\gamma P}{1-\gamma S+\sigma B}+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}=$$

$$\frac{1+\gamma P}{(1-\gamma S)\left(1+\dfrac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)}+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}=\underbrace{\frac{1+\gamma P}{1-\gamma S}}_{H}\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}=\cdot \tag{29}$$

$$\underbrace{k\frac{P}{S}}_{I}\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S^3}}{1-\gamma S+\sigma B}$$

Тут враховано той факт, що у точці D похідні ізентропи Пуассона (позначена літерою I у рівнянні (29)) та рівняння Гюгоніо (14) для ідеального газу $A = B = 0$ (позначена літерою H у рівнянні (29)) рівні [20,21]. Тут також використаний біноміальний ряд у припущенні малих значень параметра.

Помножимо (29) на S^2, це дає

$$S^2\frac{P-1}{1-S}=kPS\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S}}{1-\gamma S+\sigma B}=k\frac{p_2}{\rho_2}\frac{\rho_1}{p_1}\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S}}{1-\gamma S+\sigma B}\,.$$

$$=a_2^2\frac{\rho_1}{p_1}\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S}}{1-\gamma S+\sigma B} \tag{30}$$

Тепер перетворюємо рівняння для швидкості продуктів детонації (22)

$$V_2^2 = S^2 \frac{P-1}{1-S}\frac{p_1}{\rho_1} = S^2 \frac{P-1}{1-S}\frac{p_1}{\rho_1}. \tag{31}$$

З огляду на це перепишемо (30)

$$S^2 \frac{P-1}{1-S}\frac{p_1}{\rho_1} = a_2^2\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S}}{1-\gamma S+\sigma B}\frac{p_1}{\rho_1}. \tag{32}$$

Порівняння (31) та (32) дозволяє знайти рівняння для швидкості продуктів детонації

$$V_2^2 = a_2^2\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)+\frac{1}{kP}\frac{\sigma A\dfrac{2B-S}{S^2}}{(1-\gamma S)\left(1+\dfrac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)}a_2^2 = a_2^2\left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)\left(1+\frac{\sigma A}{kP}\frac{2B-S}{S^2(1-\gamma S)}\right). \tag{33}$$

або у безрозмірному вигляді

$$\mathrm{Ma}_2^2 = \left(1-\frac{\sigma B}{1-\gamma S}\right)\left(1+\frac{\sigma A}{kP}\frac{2B-S}{S^2(1-\gamma S)}\right). \tag{34}$$

У рівняннях (33) і (34) можна виключити параметр P за допомогою модифікованого рівняння Гюгоніо (14). Рівняння (33) та (34) показують, що для ідеального газу продукти горіння рухаються від фронту детонації з критичною (звуковою) швидкістю. Для газу Ван дер Ваальса швидкість продуктів горіння може бути більшою за критичну. Причому обидва фактори і додатковий тиск (A) і додатковий об'єм (B) призводять до прискорення продуктів горіння. Додатковий тиск передає свою енергію потоку і таким чином викликає прискорення. Додатковий об'єм призводить до зменшення ступеня стиснення так само, як і граничного стиснення (28). Отже швидкість потоку зростає. Якщо в рівнянні (34) використовувати граничне стиснення (28), то отримаємо

$$\mathrm{Ma}_2^2 = \frac{1+3kB}{1+kB}\left(1-\frac{2A(k+1)^2(kB-1)((k+2)B-k)}{k(kB+1)(2A(k+1)(kB-1)(k(B^2+B-1)+B)+k(B+1)^2(Q+k(B(3k+1)-kQ-3)-1))}\right). \tag{35}$$

Висновки

На основі класичної теорії детонації отримані співвідношення, що визначають граничний тиск для існування детонації у газі Ван дер Ваальса. Показано залежність граничного тиску від параметрів A та B рівняння стану Ван дер Ваальса. Збільшення параметра A уповільнює зростання тиску в хвилі детонації, а збільшення параметра B його посилює.

Отримано рівняння визначення швидкості поширення продуктів горіння у реальному газі. Порівняно зі швидкістю поширення продуктів горіння в ідеальному газі. Для ідеального газу продукти горіння рухаються від фронту детонації з критичною (звуковою) швидкістю. Для газу Ван дер Ваальса швидкість продуктів горіння може бути більшою за критичну. Причому обидва параметри, що характеризують додатковий тиск (A) і додатковий об'єм

(*B*) призводять до прискорення продуктів горіння. Додатковий тиск передає свою енергію потоку і таким чином викликає прискорення. Додатковий об'єм призводить до зменшення ступеня стиснення так само, як і граничного стиснення (28). Отже швидкість потоку зростає.

Робота профінансована в рамках програми наукових проектів НАН України (№ 6541230) «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок». 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. *Liu Y., Han X., Zhang Z.* Study on the propulsive performance of oblique detonation engine. Energy. 2024, Vol. 292, 1, 130519. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130519

2. *Shi H., Hu Y., Li T.,Tao Z., Li X., Wu J., Murphy A.B., Qiu A.* Detonation of a nitromethane-based energetic mixture driven by electrical wire explosion. Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 55, № 5. DOI 10.1088/1361-6463/ac3174

3. *Fedorov A. V., Fomin P. A., Tropin D. A., Chen Z.-R.* Parameters, limits, attenuation, and suppression of detonation in mixtures of an explosive gas with chemically inert microparticles. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. 85(2):368-381 DOI: 10.1007/s10891-012-0662-5

4. *Polatayko M.* Determination of Values Range of Physical Quantities and Existence Parameters of Normal Spherical Detonation by the Method of Numerical Simulation. 2021. P.290. DOI: 10.5772/intechopen.96285. EBOOK (PDF) ISBN 978-1-83969-315-1

5. *Dihua O.Y., ChunWei Q., Xiaowen Q., Xueying H., Shizhou M., Jiaxing S.* Determination of thickness parameters of detonation shell and safety performance analysis. Engineering Reports. 2023; 5(8):e12630. doi: 10.1002/eng2.12630

6. *Dahake A.P., Singh A.V.* A Comparative Study of Critical Detonation Parameters for Jet A and an Alcohol-to-Jet Synthetic Biofuel. AIAA 2022-0819. Session: Combustion Chemistry and Chemical Kinetics II. Published Online: 2021. https://doi.org/10.2514/6.2022-0819

7. *Zhang J., Luong M. B., Im, H. G.* Effects of heat diffusion and turbulence on detonation development of hydrogen/air mixtures under engine-relevant conditions. Combustion and Flame. 2024. 266, 113554. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113554

8. *Calvo-Rivera A., Huete C., Velikovich A. L.* The stability of expanding reactive shocks in a van der Waals fluid. Physics Fluids. 2022. 34, 046106; doi: 10.1063/5.0087073

9. *Weng Z. , Mével R. , Law C. K.* On the critical initiation of planar detonation in Noble-Abel and van der Waals gas Author links open overlay panel. Combustion and Flame. 2023. Vol. 255, 112890. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112890

10. *Pielemeier K. R., Joseph M.* Anomalous Waves in Non-Ideal Detonation Dynamics. Powers AIAA 2022-0396. Session: Ignition, Detonation, and Supersonic Combustion. 2021. https://doi.org/10.2514/6.2022-0396

11. *Weng Z., Méve R*. Real gas effect on steady planar detonation and uncertainty quantification. Combustion and Flame. 2022. Vol. 245, 112318. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112318

12. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P.* Shock Wave in van der Waals Gas. J. Non-Equilibrium Thermodynamic. 2022. 47(3). P. 255 – 267. doi: https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099

13. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Kovetskaya M. M., Kovetska Y. Y.* Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. Physics of Fluids. 2023. 35, 026110. https://doi.org/10.1063/5.0138331

14. *Clavin P.* Advances in the analytical study of the dynamics of gaseous detonation waves. Comptes Rendus Mécanique. 2019. Vol. 347, 4, Pages 273-286. https://doi.org/10.1016/j.crme.2019.03.008

15. *Rankine W.J.M*. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1870. 160. 277–288.

16. *Hugoniot H.* Mémoire sur la propagation des mouvement dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)], J. l'École Polytechnique (in French) 1887. 57. 3–97. See also:

17. *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)], J. l'École Polytechnique, 1889. 58. 1–125.

18.*Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кондратьєва О.О., Скіцько О.І.* Вплив тепловиділення на детонацію у реальному газі. Теплофізика та теплоенергетика. 2024. 46, № 1. С. 11 – 17. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.2

19. *Loitsyanskii L.G*. Mechanics of Liquids and Gases (International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics), 2nd ed., Elsevier Ltd, 1966.

20. *Jouget E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz. Journal de mathématiques pures et appliquées. 1905. Tome 1: 347-425. http://eudml.org/doc/234706.

21. *Jouget E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz. Journal de mathématiques pures et appliquées. 1906. Tome 2: 5-86. http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1906_6_2__5_0

LIMIT OF PARAMETERS DURING DETONATION IN VAN DER WAALS GAS

Avramenko A.A.[1], Kovetskaya M.M.[2], Anastasiev D.V.[3], Oliinyk L.V.[4]

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

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

[2]PhD (Engin.), Senior Research Scientist, https://orcid.org/0000-0002-8455-4689, e-mail kovetskamargarita@ukr.net

[3]graduate student, dmytro.anastasiev@gmail.com

[4]Research

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.2

The study of detonation processes in gaseous media is of interest for the coal mining, aviation, aerospace industries, and hydrogen energy. Under high pressure conditions during the passage of a detonation wave, it is necessary to take into account the equation of state of a real gas, the effects of endothermicity and exothermicity.

The paper considers the flow of real gas through a plane detonation wave. A modified Rankine-Hugoniot equation has been obtained to describe the dynamics of changes in the parameters of a van der Waals gas flow when it passes through a detonation wave.

The relations that determine the limiting pressure for the existence of detonation in a Van der Waals gas were obtained. The dependence of the limiting pressure on the parameters A and B of the Van der Waals equation of state is shown. An increase in parameter A slows down the growth of pressure in the detonation wave, and an increase in parameter B intensifies it.

An equation for determining the velocity of combustion products in a real gas is obtained. Compared with the velocity of combustion products in an ideal gas. For an ideal gas, combustion products flow from the detonation front at a critical (sonic) velocity. For a Van der Waals gas, the velocity of combustion products can be greater than the critical one. Moreover, both parameters characterizing the additional pressure (A) and the additional volume (B) lead to the acceleration of combustion products. The additional pressure transfers its energy to the flow and thus causes acceleration. The additional volume leads to a decrease in the degree of compression in the same way as the limiting compression (28). Therefore, the flow velocity increases.

References 21, figures 1.

Key words: Heat transfer, van der Waals gas, detonation, shock wave.

1. *Liu Y., Han X., Zhang Z.* Study on the propulsive performance of oblique detonation engine. Energy. 2024, Vol. 292, 1, 130519. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130519

2. *Shi H., Hu Y., Li T.,Tao Z., Li X., Wu J., Murphy A.B., Qiu A.* Detonation of a nitromethane-based energetic mixture driven by electrical wire explosion. Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 55, № 5. DOI 10.1088/1361-6463/ac3174

3. *Fedorov A. V., Fomin P. A., Tropin D. A., Chen Z.-R.* Parameters, limits, attenuation, and suppression of detonation in mixtures of an explosive gas with chemically inert microparticles. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. 85(2):368-381 DOI: 10.1007/s10891-012-0662-5

4. *Polatayko M.* Determination of Values Range of Physical Quantities and Existence Parameters of Normal Spherical Detonation by the Method of Numerical Simulation.2021. P.290. DOI: 10.5772/intechopen.96285. EBOOK (PDF) ISBN 978-1-83969-315-1

5. *Dihua O.Y., ChunWei Q., Xiaowen Q., Xueying H., Shizhou M., Jiaxing S.* Determination of thickness parameters of detonation shell and safety performance analysis. Engineering Reports. 2023; 5(8):e12630. doi: 10.1002/eng2.12630

6. *Dahake A.P., Singh A.V.* A Comparative Study of Critical Detonation Parameters for Jet A and an Alcohol-to-Jet Synthetic Biofuel. AIAA 2022-0819. Session: Combustion Chemistry and Chemical Kinetics II. Published Online: 2021. https://doi.org/10.2514/6.2022-0819

7. *Zhang J., Luong M. B., Im, H. G.* Effects of heat diffusion and turbulence on detonation development of hydrogen/air mixtures under engine-relevant conditions. Combustion and Flame. 2024. 266, 113554. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113554

8. *Calvo-Rivera A., Huete C., Velikovich A. L.* The stability of expanding reactive shocks in a van der Waals fluid. Physics Fluids. 2022. 34, 046106; doi: 10.1063/5.0087073

9. *Weng Z. , Mével R. , Law C. K.* On the critical initiation of planar detonation in Noble-Abel and van der Waals gas Author links open overlay panel. Combustion and Flame. 2023. Vol. 255, 112890. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112890

10. *Pielemeier K. R., Joseph M.* Anomalous Waves in Non-Ideal Detonation Dynamics. Powers AIAA 2022-0396. Session: Ignition, Detonation, and Supersonic Combustion. 2021. https://doi.org/10.2514/6.2022-0396

11. *Weng Z., Méve R.* Real gas effect on steady planar detonation and uncertainty quantification. Combustion and Flame. 2022. Vol. 245, 112318. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112318

12. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P.* Shock Wave in van der Waals Gas. J. Non-Equilibrium Thermodynamic. 2022. 47(3). P. 255 – 267. doi: https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099

13. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Kovetskaya M. M., Kovetska Y. Y.* Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. Physics of Fluids. 2023. 35, 026110. https://doi.org/10.1063/5.0138331

14. *Clavin P.* Advances in the analytical study of the dynamics of gaseous detonation waves. Comptes Rendus Mécanique. 2019. Vol. 347, 4, Pages 273-286. https://doi.org/10.1016/j.crme.2019.03.008

15. *Rankine W.J.M.* On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1870. 160. 277–288.

16. *Hugoniot H*. Mémoire sur la propagation des mouvement dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)], J. l'École Polytechnique, (in French) 1887. 57. 3–97.

17. *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)], J. l'École Polytechnique, (in French) 1889. 58. 1–125.

18. *Avramenko A. O., Kovetska M.M., Kondratieva O.O., Skitsko O.I.* Vplyv teplovydelennia na detonatsyiu u realnomu gazi.[Influence of heat generation on detonation in real gas]. Teplofizyka ta teploenerhetyka. 2024. 46, № 1. С. 11 – 17. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.2 (in Ukr)

19. *Loitsyanskii L.G.* Mechanics of Liquids and Gases (International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics), 2nd ed., Elsevier Ltd, 1966.

20. *Jouget E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz. Journal de mathématiques pures et appliquées. 1905. Tome 1: 347-425. http://eudml.org/doc/234706.

21. *Jouget E.* Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz. Journal de mathématiques pures et appliquées. 1906. Tome 2: 5-86. http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1906_6_2__5_0

Отримано 11.04.2025
Received 11.04.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 664.8.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ФОРМИ МАТЕРІАЛУ ПРИ СУШІННІ ХУРМИ (DIOSPYROS KAKI L.)

Петрова Ж.О.[1], член-кореспондент НАН України, д.т.н., **Новікова Ю.П.**[2], доктор філософії

[1]*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, http://orcid.org/0000-0001-7385-8495*
[2]*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: yuliianovikova3@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-7385-8495*

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.3

У статті досліджено кінетику сушіння хурми (Diospyros kaki L.) за різних режимів зневоднення та форми матеріалу. Визначено, що комбіновані та ступеневі режими дають можливість скоротити процес сушіння майже в 1,41 – 1,92 рази, в залежності від форми матеріалу, зі збереженням кольору і смаку матеріалу. При порівнянні форми матеріалу при сушінні найменша тривалість сушіння у скибочок порівняно з іншими.

The paper investigates the kinetics of drying persimmon (Diospyros kaki L.) under different dehydration regimes and material shape. It has been determined that combined and stepwise modes make it possible to reduce the drying process by almost 1.41-1.92 times, depending on the shape of the material, while maintaining the colour and taste of the material. When comparing the shape of the material during drying, slices have the shortest drying time compared to others.

Бібл. 40, рис. 8.

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

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. Продовольча безпека стала нагальною проблемою для агрохарчової промисловості в останні десятиліття. Щороку викидається приблизно 1,5 мільярда тонн харчових продуктів, що загострює проблеми, пов'язані з дефіцитом продовольства, неефективністю енергоспоживання та зміною клімату [1]. Для зменшення цих значних втрат, для консервування харчових продуктів використовуються різні методи сушіння, такі як сублімаційне сушіння, мікрохвильове сушіння, конвекційне сушіння гарячим повітрям, періодичне мікрохвильово-конвекційне сушіння та гібридне сушіння [1]. Сушіння є важливим процесом у виробництві різних харчових продуктів, таких як хлібобулочні інгредієнти, чай, трави, кава, сухі молочні продукти, локшина швидкого приготування та борошно [2, 3]. Процес сушіння включає тепло- та масообмін [4 - 6].

Зневоднення сільськогосподарської продукції є важливим для деактивації мікроорганізмів, що спричиняють гниття, для ефективного зберігання [7, 8]. Хоча сушіння має різні переваги, воно споживає приблизно 15% енергії від загального обсягу промислового споживання енергії [9]. Також під час процесу сушіння продукти зазнають різних фізичних змін, таких як зміна форми зразка через усадку. Це дозволяє мінімізувати витрати на пакування, зберігання та транспортування, а також забезпечує можливість зберігання продукту за температури навколишнього середовища [10]. Фізичні зміни сильно залежать від умов експлуатації, таких як відносна вологість повітря, температура, час сушіння та товщина зразка [11 - 13]. Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту [14, 15]. Отже, існує серйозна проблема у створенні та впровадженні у великих масштабах сучасних енергоефективних технологій нагрівання, які можуть зменшити споживання енергії в процесі сушіння та зберегти мікро- та макроелементи висушеного продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Продукти, які є повноцінними, багатими або з підвищеним вмістом мікро- і макроелементами, називаються

функціональними продуктами харчування, і можуть сприяти здоров'ю поза їхньою основною функцією забезпечення необхідними поживними речовинами [16, 17].

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Ж.О. розроблено класифікацією основних рослинних функціональних інгредієнтів, які залишилися у сухих продуктах: антиоксидантні, фітоестрогенні, фолатовмісні та пребіотичні [18].

Каротиноїди продемонстрували великий потенціал, як антиоксидант, у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості завдяки своїй багатій харчовій цінності та функціональним властивостям [19, 20]. Більшість каротиноїдів міститися в жовто-помаранчевих та червоних фруктах, овочах та ягодах. Також вони міститься в низці зелених овочах та травах [19].

Хурма (Diospyros kaki L.) – це субтропічний фрукт, який є джерелом бета-каротину, вітамінів А і Е, аскорбінової кислоти, багата вуглеводами, дубильними речовинами і фенольними сполуками, є хорошим джерелом клітковини, а також має потужну антиоксидантну дію [21 – 25]. Традиційними виробниками хурми є Китай, Корея та Японія, а також вона була натуралізована в багатьох країнах Східної Азії та Південної Європи [26–28]. Плоди хурми можна переробляти на такі продукти, як сухофрукти [29], джеми, хурмовий оцет, фруктові соки [30, 31]. Сушіння хурми проводять за різними методами, такими як сушіння на сонці або на відкритому повітрі [32 – 34], конвективне [35], мікрохвильове, вакуумне [36], сублімаційне [37], інфрачервоне [38] та різні комбіновані методи [39].

Конвективне сушіння є одним із найкращих методів сушіння каротинвмісних матеріалів, таких як хурма, але зазвичай воно має велику тривалість, яку слід скоротити для кращого збереження функціональних властивостей. Тому ***метою роботи*** є дослідження комбінованих методів сушіння та форми матеріалу, для зменшення тривалості.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використовували плоди хурми, які спочатку мили, або нарізали на кубики розміром близько 5х5 (рис. 1 а) мм або натирали за допомогою тертки на стружку (рис. 1 б) або нарізали за допомогою шатківниці для овочів на скибочки (рис. 1 в) товщиною 2 мм.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [20].

В теорії сушіння *вологість* матеріалу зазвичай розраховується відносно маси абсолютно сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною, а також є зручною для розрахунків [40]. Перехід від вологості W^c, розрахованій 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 вологи, 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 [40]:

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

а б в

Рис. 1. Зовнішній вигляд хурми кубики(а), стружки (б) та скибочки (в)

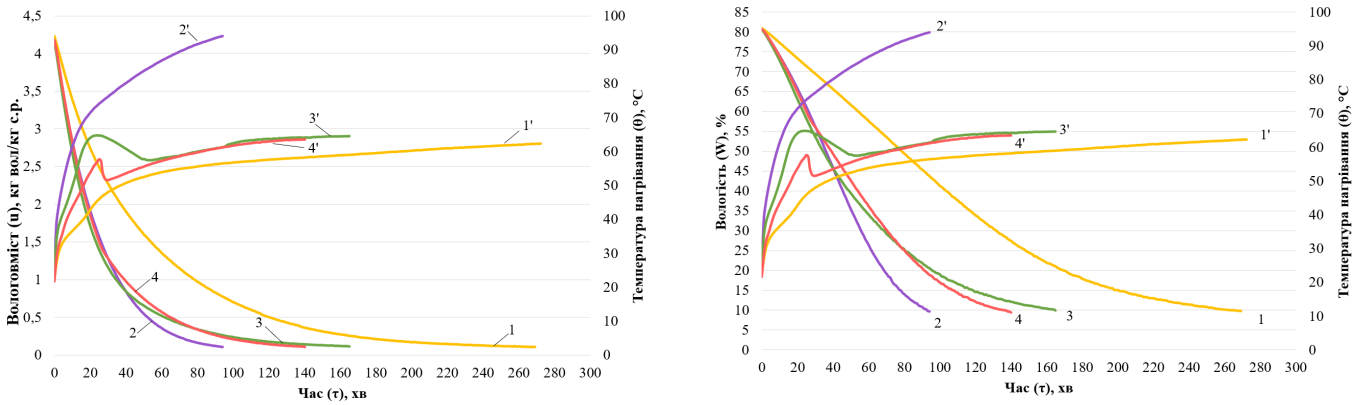
Fig. 1. Appearance of persimmon cubes (a), chips (b) and slices (c)

Результати дослідження

Дослідження хурми проводили за режимами сушіння 65, 100, 100/65 ºС та комбінованим 3800Вт/м^2 +65 ºС, швидкість теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу 9±2%.

Для режимів сушіння 100/65 ºС та 3800Вт/м^2 +65 ºС на початку процесу температуру матеріалу підіймали до 58 ºС, після чого процес сушіння відбувався за температури теплоносія 65 ºС.

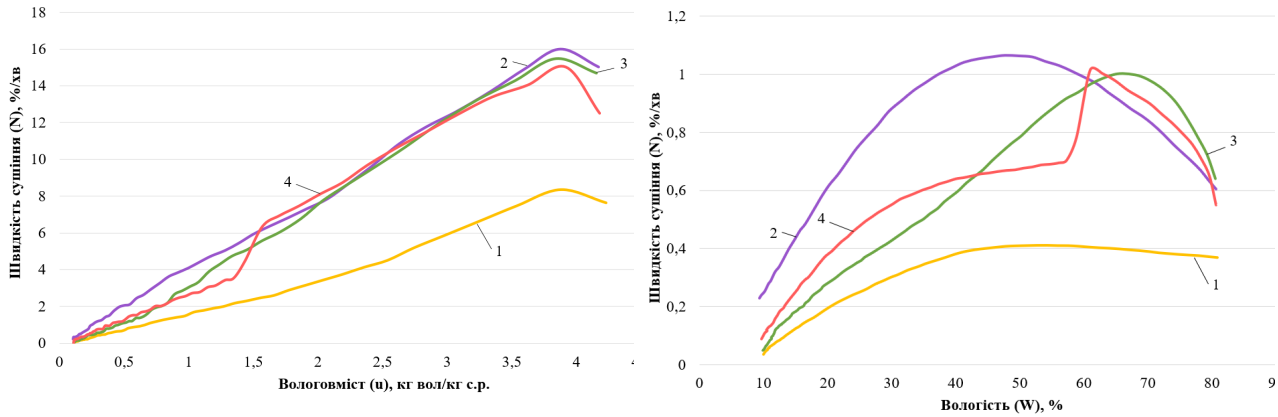
На рис. 2 показано зміни вологовмісту (рис. 2 а), вологості (рис. 2 б) та температури в центрі шару плодів хурми, нарізаних кубиками 5х5 мм. Як видно на рисунку 2, найдовший час сушіння становить 269 хвилин при 65ºС. Найкоротший час сушіння – 94 хвилини при 100ºС [20]. Як бачимо з рис. 2, комбінований режим 3800 Вт/м^2 +65ºС та ступеневий режим 100/65ºС мають коротший час сушіння, ніж режим 65ºС – 140 та 165 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м^2 +65 ºС працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м^2 та теплоносій 65 ºС, після досягнення температури матеріалу 58 ºС вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 51,5 ºС, далі вона підіймається до 63,5 ºС [20].



а б

Рис. 2. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм від часу в шарі:
1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с [20]

Fig. 2. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmons cut into 5x5 mm cubes with time in the bed: 1 – 65 ºC, 3 m/s; 2 – 100 ºC, 3 m/s; 3 – 100/65 ºC, 3 m/s; 4 – 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s [20]



а б

Рис. 3. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм в шарі: 1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с [20]

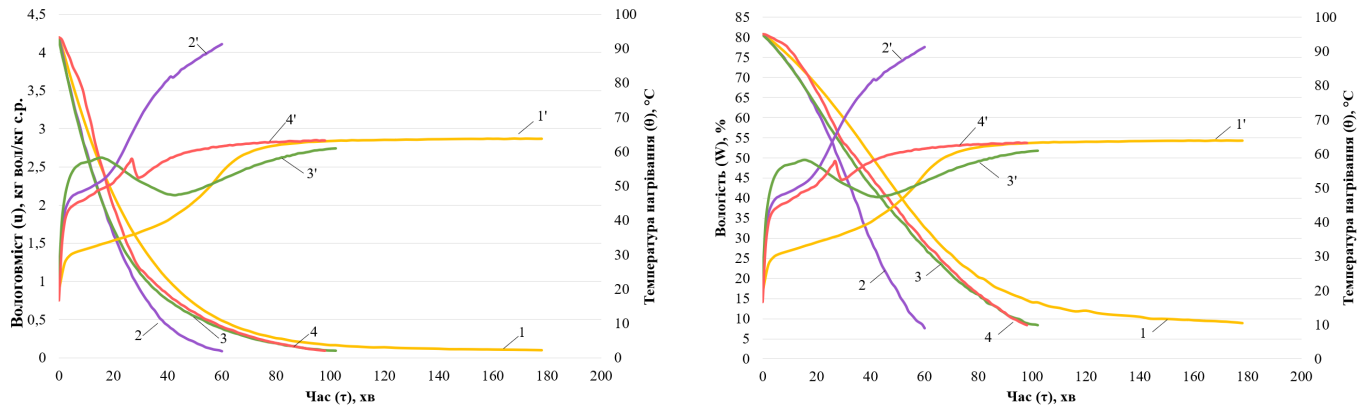
Fig. 3. Changes in drying speed (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmons cut into 5x5 mm cubes in a layer: 1 – 65 ºC, 3 m/s; 2 – 100 ºC, 3 m/s; 3 – 100/65 ºC, 3 m/s; 4 – 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s [20]

За ступеневим режимом 100/65 ºС матеріал сушили при температурі теплоносія 100 ºС до температури матеріалу 58 ºС. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 ºС, при цьому температура матеріалу збільшилась до 64,8 ºС, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 57,5 ºС, та подальшому збільшувалася до 64,2 ºС [20].

На рис. 3 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми нарізаної на кубики розміром 5х5 мм. Як видно з рис. 3 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 ºС і становить в залежності від вологості 1,06 %/хв та вологовмісту 16,01%/хв, найменша за режимом 65ºС – від вологості 0,41%/хв та від вологовмісту 8,36%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м^2 +65 ºС за графіком від вологості (рис. 3 б) має максимальну швидкість сушіння 1,02 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 0,71%/хв і потім іде поступове зменшення швидкості. При вологовмісті (рис. 3 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість 15,03%/хв та при досягненні вологовмісту 1,5-1,3 кг вологи/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 3,54%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 ºС максимальна швидкість сушіння за вологістю 1%/хв та вологовмістом 15,49%/хв.

На рисунку 4 показано зміни вологовмісту (рис. 4 а), вологості (рис. 4 б) та температури в середині шару хурми натертої стружкою. Як видно на рисунку 4, найдовший час сушіння становить 178,1 хвилин при 65ºС. Найкоротший час сушіння – 60 хвилин при 100ºС. Як видно з рис. 4, комбінований режим 3800 Вт/м^2 +65ºС та ступеневий режим 100/65ºС мають менший час сушіння, ніж режим 65ºС – 98,1 та 102 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м^2 +65 ºС працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м^2 та теплоносій 65 ºС, після досягнення температури матеріалу 58 ºС вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 52,5 ºС, далі вона підіймається до 63,1 ºС. За ступеневим режимом 100/65 ºС матеріал сушили при температурі теплоносія 100 ºС до температури матеріалу 58 ºС. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 ºС, при цьому температура матеріалу збільшилась до 58,3 ºС, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 47,4 ºС, та подальшому збільшувалася до 60,9 ºС.

На рис. 5 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми натертої стружкою. Як видно з рис. 5 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 ºС і становить в залежності від вологості 1,8 %/хв та вологовмісту 16,2%/хв, найменша за режимом 65ºС – від вологості 0,95%/хв та від вологовмісту 11,65%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м^2 +65 ºС за графіком від вологості (рис. 5 б) має максимальну швидкість сушіння 1,43 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 0,92%/хв і потім іде поступове зменшення швидкості. При вологовмісті (рис. 5 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість 14,99%/хв та при досягненні вологовмісту 1,42-1,15 кг вологи/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 3,66%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим ре-



а б

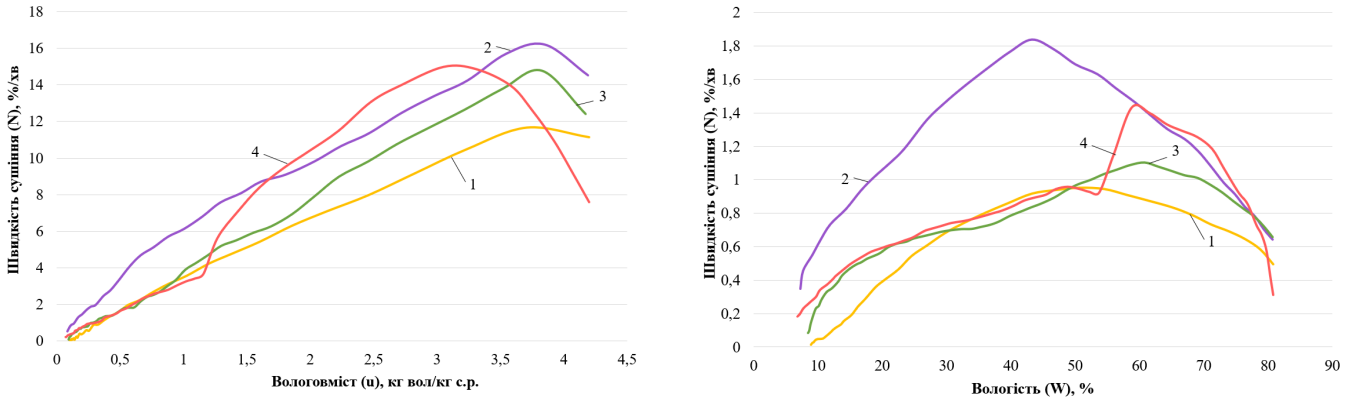
Рис. 4. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми натертої стружкою від часу в шарі δ ≈ 5 мм: 1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с

Fig. 4. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmon grated into shavings over time in a layer δ ≈ 5 mm: 1 – 65 ºC, 3 m/s; 2 – 100 ºC, 3 m/s; 3 – 100/65 ºC, 3 m/s; 4 – 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s

жимом 100/65 ºС максимальна швидкість сушіння за вологістю 1,1%/хв та вологовмістом 13,79%/хв.

На рисунку 6 показано зміни вологовмісту (рис. 6 а), вологості (рис. 6 б) та температури в середині шару хурми нарізаною скибочками товщиною 2 мм. Як видно на рисунку 8, найдовший час сушіння становить 72 хв при 65ºС. Найкоротший час сушіння – 34,1 хв при 100ºС. Як видно з рис. 8, комбінований режим 3800 Вт/м^2 +65ºС та ступеневий режим 100/65ºС мають менший час сушіння, ніж режим 65ºС – 47,1 та 51 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м^2 +65 ºС працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м^2 та теплоносій 65 ºС, після досягнення температури матеріалу 58 ºС вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 47,4 ºС, далі вона підіймається до 58,76 ºС. За ступеневим режимом 100/65 ºС матеріал сушили при температурі теплоносія 100 ºС до температури матеріалу 58 ºС. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 ºС, при цьому температура матеріалу збільшилась до 60,4 ºС, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 58,7 ºС, та подальшому збільшувалася до 61,4 ºС.

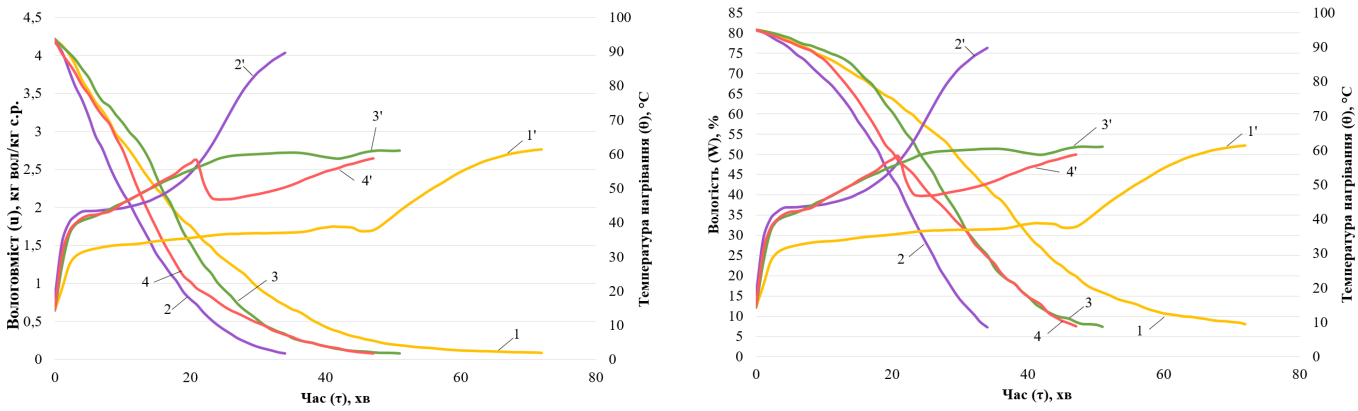
На рис. 7 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми нарізаною скибочками товщиною 2 мм. Як видно з рис. 7 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 ºС і становить в залежності від вологості 3,3 %/хв та вологовмісту 24,7%/хв, най-



а б

Рис. 5. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) хурми натертої стружкою від часу в шарі δ ≈ 5 мм: 1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с

Fig. 5. Changes in drying rate (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmon grated into shavings over time in a layer δ ≈ 5 mm: 1 – 65 ºC, 3 m/s; 2 – 100 ºC, 3 m/s; 3 – 100/65 ºC, 3 m/s; 4 – 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s



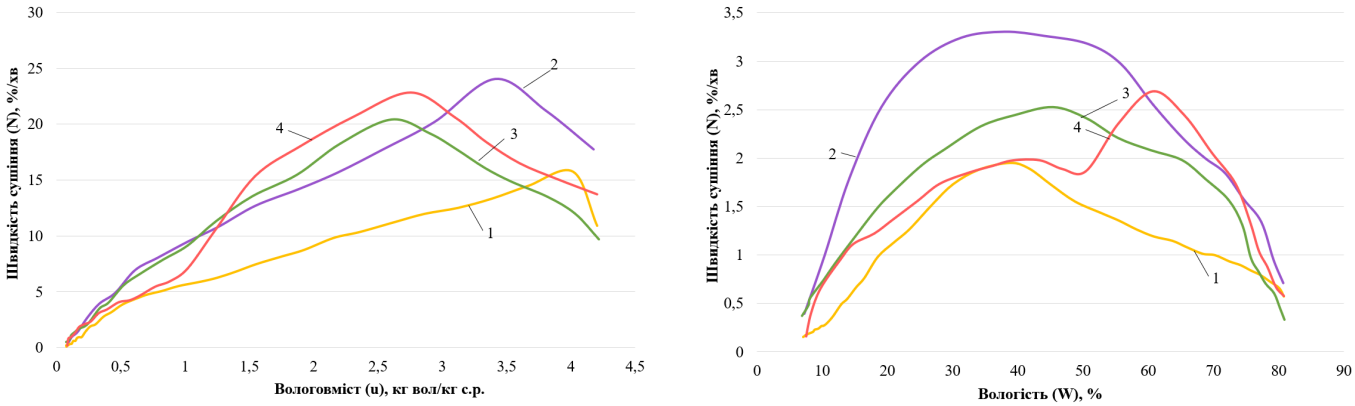
а б

Рис. 6. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми нарізаної скибочками δ ≈ 2 мм від часу в шарі: 1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с

Fig. 6. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmons cut into slices δ ≈ 2 mm over time in a layer: 1 - 65 ºC, 3 m/s; 2 - 100 ºC, 3 m/s; 3 - 100/65 ºC, 3 m/s; 4 - 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s

менша за режимом 65ºС – від вологості 1,97%/хв та від вологовмісту 15,77%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м^2 +65 ºС за графіком від вологості (рис. 7 б) має максимальну швидкість сушіння 2,69 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 1,86%/хв і потім іде поступове зменшення швидкості.

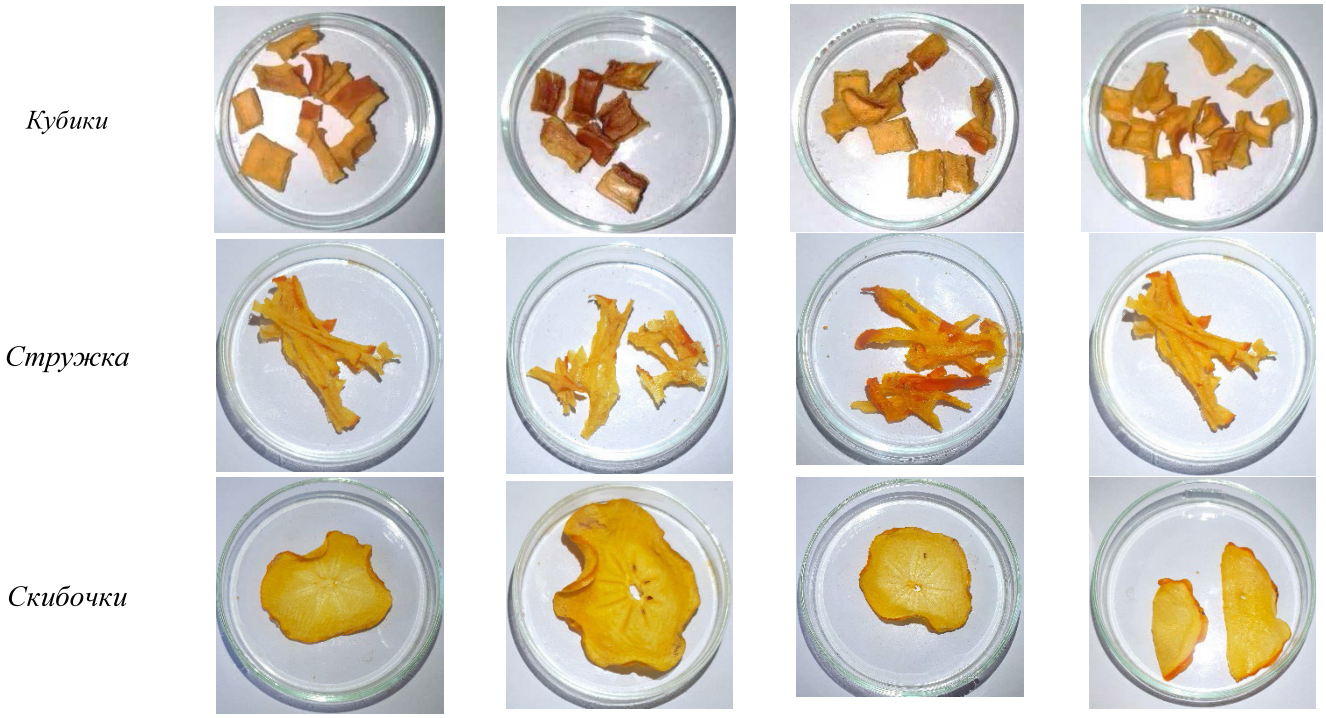
При вологовмісті (рис. 7 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість 22,8%/хв та при досягненні вологовмісту



а б

Рис. 7. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) х хурми нарізаної скибочками δ ≈ 2 мм від часу в шарі: 1 – 65 ºС, 3 м/с; 2 – 100 ºС, 3 м/с; 3 – 100/65 ºС, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м^2 +65 ºС, 3 м/с

Fig. 7. Change in drying rate (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmons cut into slices δ ≈ 2 mm over time in a layer: 1 – 65 ºC, 3 m/s; 2 – 100 ºC, 3 m/s; 3 – 100/65 ºC, 3 m/s; 4 – 3800W/m^2 +65 ºC, 3 m/s



а б в г

Рис. 8. Порівняння висушених зразків хурми при різних режимах: а – 65 ºС; б – 100 ºС; в – 100/65 ºС; г – 3800Вт/м^2 +65 ºС

Fig. 8. Comparison of dried persimmon samples under different conditions: a – 65 ºC; b – 100 ºC; c – 100/65 ºC; d – 3800 W/m^2 +65 ºCs

1,54-0,88 кг вологи/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 5,9%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 ºС максимальна швидкість сушіння за вологістю 2,5%/хв та вологовмістом 20,44%/хв.

На рисунку 8 зображена висушена хурма при різних режимах 65, 100, 100/65 ºС та комбінованим 3800Вт/м^2 +65 ºС та формах. Потемніння матеріалу спостерігається при сушінні при температурі 100 ºС (рис. 8 б) у кубиків, так як і смак стає підгорілим. При цьому при сушінні стружки та скибочок при температурі 100 ºС потемніння кольору майже не спостерігалось, але при цьому смак погіршувався. За колір відповідають каротиноїди, які витримують температуру 100 ºС при малій тривалості сушіння, але при таких режимах руйнуються вуглеводи та білки, які відповідають за смак. Найбільш збережені кольори у хурми за режимами режимах 65, ступеневим 100/65 ºС та комбінованим 3800Вт/м^2 +65 ºС (рис. 8 а, в, г). А також краще колір зберігається при сушінні стружкою та скибочками.

Висновки

У роботі виконані дослідження впливу різних режимів сушіння на плоди хурми. Визначено, що найменша тривалість сушіння за режимом 100 ºС за різних форм, але при цьому спостерігається потемніння матеріалу та погіршення смаку. Найбільша тривалість при режимі 65 ºС, що більше за 100 ºС у 2,86 разів при сушінні кубиків, стружки у 2,96 рази та у скибочок 2,1 рази, але при цьому зберігається яскравий колір та смак. Ступеневий 100/65 ºС та комбінований 3800Вт/м^2 +65 ºС режими сушіння інтенсифікують процес порівняно з 65 ºС у 1,92 та 1,63 рази для кубиків; у 1,75 та 1,82 рази для стружки; у 1,41 та 1,52 рази для скибочок. Тому доцільно використовувати комбіновані або ступеневі режими сушіння для інтенсифікації процесу. При порівнянні форми матеріалу при сушінні найменша тривалість сушіння у скибочок порівняно з іншими. При цьому сушіння скибочками добре підходить для виробництва чипсів, а стружку можна використовувати при виробництві функціональних порошків.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Hassan A., Joardder M. U., Karim A.* A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry Scale dryers. Thermal Science and Engineering Progress 2025, 61, 103533. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103533

2. *Pham N. D., Khan M. I. H., Karim M. A.* A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. Food chemistry, 2020, 325, 126932. ttps://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126932

3. *Kumar C., Joardder M. U. H., Karim A., Millar G. J., Amin Z.* Temperature redistribution modelling during intermittent microwave convective heating. Procedia Engineering, 2014, 90, 544-549. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.770

4. *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.

5. *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.

6. *Снєжкін 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/ttpe.4.2024.1

7. *El-Mesery H. S., El-Seesy A. I., Hu Z., Li, Y.* Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157, 112070. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070

8. *Inyang U., Oboh I., Etuk B*. Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

9. *Kumar C., Joardder M. U., Farrell T. W., Millar G. J., Karim A.* A porous media transport model for apple drying. Biosystems engineering, 2018, 176, 12-25. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021

10. *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.

11. *Patidar A., Vishwakarma S., Meena D.* Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. Food Frontiers, 2021, 2(1) 46-61. https://doi.org/10.1002/fft2.64

12. *Salimi Hizaji A., Maghsoudlou Y., Jafari S. M.* Application of peleg model to study effect of water temperature and storage time on rehydration kinetics of air dried potato cubes. Latin American applied research, 2010, 40(2), 131-136.

13. *Amiri Chayjan R.* Modeling some drying characteristics of high moisture potato slices in fixed, semi fluidized and fluidized bed conditions. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(6), 1229-1241.

14. *Doymaz L.* Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.

15. *Okos M.R., Narasimban G., Singh R.K., Witnauer A.C.,* Food dehydration. Ln D.R Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992. 144 p.

16. *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.

17. *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.

18. *Петрова Ж.О, Граков Д.П.* Тепломасообмінні процеси під час одержання комбінованих каротиновмісних продуктів. Теплофізика та Теплоенергетика, 2025, 47(1), С. 30-40. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.3

19. *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.

20. *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

21. *Bozkir H., Ergün A. R., Serdar E., Metin G., Baysal T.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. Ultrasonics sonochemistry, 2019, 54, 135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006

22. *Karakasova L., Babanovska-Milenkovska F., Lazov M., Karakasov B., Stojanova M*. Quality proparties of solar dried persimmon (Diospyros kaki). Journal of Hygienic Engineering and Design, 2013, 54–59.

23. *Suzuki T., Someya S., Hu F., Tanokura M.* Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (Diospyros kaki). Food Chemistry, 2005, 93(1), 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017

24. *Luo Z.* Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (Diospyros kaki L.) fruit. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(2), 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010

25. *Butt M. S., Sultan M. T., Aziz M., Naz A., Ahmed W., Kumar N., Imran M.* Persimmon (Diospyros kaki) fruit: hidden phytochemicals and health claims. EXCLI journal, 2015, 14, 542–561. Doi: 10.17179/excli2015-159

26. *Anjum N., Bhat A., Hameed F.* Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (Diospyros kaki L.) pulp. Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 2021, 22(39-40), 67-76.

27. *Jang I. C., Oh W. G., Ahn G. H., Lee J. H., Lee S. C.* Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit. Food science and biotechnology, 2011, 20, 71-77. Doi:10.1007/s10068-011-0010-0

28. *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.

29. *Zhou M., Chen J., Bi J., Li X., Xin G.* The roles of soluble poly and insoluble tannin in the enzymatic browning during storage of dried persimmon. Food Chemistry, 2022, 366, 130632. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632

30. *Xu Y., Liu C., Yang X., Wu K., Gong B.* Genome-wide microsatellite characterization and marker development in Diospyros oleifera. Industrial Crops and Products, 2023, 203, 117182. https://doi.org/10.3390/agriculture13050955

31. *Lalou S., Ordoudi S. A., Mantzouridou F. T.* On the effect of microwave heating on quality characteristics and functional properties of persimmon juice and its residue. Foods, 2021, 10(11), 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 https://doi.org/10.3390/foods10112650

32. *Hafizov G., Hafizov S., Hafizov R.* Processing Methods of Dried Persimmons. Preprints, 2023. doi:10.20944/preprints202309.1119.v1

33. Kim J. H., Chung I. K., Kim H. Y., Kim K. M. Comparison of the quality of dried persimmon (Diospyros kaki THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives. Food Science & Nutrition, 2018, 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673

34. *Kang W. W., Kim J. K., Oh S. L., Kim J. H., Han J. H., Choi J. U.* Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 2023, 33(2), 386–391. https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386

35. *Senadeera W., Adiletta G., Önal B., Di Matteo M., Russo P.* Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. Foods, 2020, 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101

36. *Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S. K., Li S. B., Liu Z. L., Wang H., Chen X.J., Xiao H. W.* Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity. Plants, 2022, 11(19), 2500. https://doi.org/10.3390/plants11192500

37. *Dağdeviren A., Acar B., Alhammadi A., Roshanaeı K., Coşkun T., İnanç Ö., Özkaymak M.* Freeze-drying of persimmon (diospyros kaki) slices investigation of drying characteristics. Politeknik Dergisi, 2021, 26(2), 487-494. https://doi.org/10.2339/politeknik.949139

38. *Polat A., Taskin O., Izli N*. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. Journal of Food Science, 2024, V.89, Is.4., 2332-2346 https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994

39. *Borah M. S., Raj G. B., Tiwari A., Dash K. K.* Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14, 100816. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816

40. *Ткаченко С. Й., Співак О. Ю.* Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND MATERIAL SHAPE DURING DRYING OF PERSIMMON (DIOSPYROS KAKI L.)

Petrova Zh.O.[1], Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Novikova Yu.P**[2], PhD (Engin.)

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

[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, yuliianovikova3@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-7385-8495*

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.3

Today, the world is trying to solve the problem of preserving biologically active components in the process of processing food raw materials using traditional drying methods. Drying is a complex and energy-intensive technological process. And in the future, the problem of reducing energy consumption for drying processes arises. Therefore, there is an urgent need to create and widely implement modern energy-efficient heat technologies that reduce energy consumption for drying processes and allow micro- and macroelements to be preserved in the dried product. Products containing sufficient amounts of micro- and macroelements beneficial to the human body can reduce the risk of chronic diseases and improve physical health and mental well-being.

The most common biologically active substances are carotenoids, which are classified as antioxidants. Carotenoids have significant potential in the food, cosmetics and pharmaceutical industries. Carotenoids are a type of terpenoid pigment that are primarily responsible for the bright yellow, orange and red colours of fruits and flowers.

Persimmon (Diospyros kaki L.) is a subtropical fruit that is a source of beta-carotene, vitamins A and E, ascorbic acid, rich in carbohydrates, tannins and phenolic compounds, is a good source of fibre, and also has powerful antioxidant properties.

Convective drying is one of the best methods for drying carotene-containing materials such as persimmons, but it usually takes a long time, which should be reduced to better preserve functional properties. Therefore, the ***aim of this work*** is to study combined drying methods and material forms to reduce the duration.

The work involved conducting drying studies on an experimental convective stand for persimmons.

The results show that the shortest drying time is achieved at 100 °C for different forms, but this is accompanied by darkening of the material and deterioration of taste. The longest duration is at 65 ºC, which is 2.86 times longer than 100 ºC when drying cubes, 2.96 times longer when drying shavings, and 2.1 times longer when drying slices, but the bright colour and taste are preserved. The 100/65 ºC stepwise and 3800W/m^2 +65 ºC combined drying modes intensify the process compared to 65 ºC by 1.92 and 1.63 times for cubes; by 1.75 and 1.82 times for shavings; 1.41 and 1.52 times for slices. Therefore, it is advisable to use combined or step drying modes to intensify the process. When comparing the shape of the material during drying, slices have the shortest drying time compared to others. At the same time, drying in slices is well suited for the production of chips, and shavings can be used in the production of functional powders.

Ref. 40, figure 8.

Keywords: convective drying, infrared radiation, effective drying modes, carotenoids, persimmon.

1. *Hassan A., Joardder M. U., Karim A.* A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry Scale dryers. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 61, 103533. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103533

2. *Pham N. D., Khan M. I. H., Karim M. A*. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. Food chemistry, 2020, 325, 126932. ttps://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126932

3. *Kumar C., Joardder M.U. H., Karim A., Millar G.J., Amin Z.* Temperature redistribution modelling during intermittent microwave convective heating. Procedia Engineering, 2014, 90, 544-549. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.770

4. *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.

5. *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.

6. *Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V.* Intensyvni sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnym ta kombinovanym 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/ttpe.4.2024.1 (in Ukr.).

7. *El-Mesery H. S., El-Seesy A. I., Hu Z., Li, Y.* Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157, 112070. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070

8. *Inyang U., Oboh I., Etuk B*. Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

9. *Kumar C., Joardder M.U., Farrell T.W., Millar G.J., Karim A.* A porous media transport model for apple drying. Biosystems engineering, 2018, 176, 12-25. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021

10. *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.

11. *Patidar A., Vishwakarma S., Meena D.* Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. Food Frontiers, 2021, 2(1), 46-61. https://doi.org/10.1002/fft2.64

12. *Salimi Hizaji A., Maghsoudlou Y., Jafari S. M.* Application of peleg model to study effect of water temperature and storage time on rehydration kinetics of air dried potato cubes. Latin American applied research, 2010, 40(2), 131-136.

13. *Amiri Chayjan R.*. Modeling some drying characteristics of high moisture potato slices in fixed, semi fluidized and fluidized bed conditions. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(6), 1229-1241.

14. *Doymaz L.* Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.

15. *Okos M.R., Narasimban G., Singh R.K., Witnauer A.C.* Food dehydration Ln D.R Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992.144p.

16. *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.

17. *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.

18. *Petrova, Z., & Grakov, D.* (2025). Heat and mass transfer processes during the production of combined carotene-containing products [Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia kombinovanykh karotynovmisnykh produktiv]. Teplofizyka ta Teploenerhetyka, 47(1), 30-40. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.3

19. *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.

20. *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.).

21. *Bozkir H., Ergün A. R., Serdar E., Metin G., Baysal, T.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. Ultrasonics sonochemistry, 2019, 54, 135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006

22. *Karakasova L., Babanovska-Milenkovska F., Lazov M., Karakasov B., Stojanova M.* Quality proparties of solar dried persimmon (Diospyros kaki). Journal of Hygienic Engineering and Design, 2013, 54–59.

23. *Suzuki T., Someya S., Hu F., Tanokura M.* Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (Diospyros kaki). Food Chemistry, 2005, 93(1), 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017

24. *Luo Z.* Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (Diospyros kaki L.) fruit. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(2), 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010

25. *Butt M. S., Sultan M. T., Aziz M., Naz A., Ahmed W., Kumar N., Imran M.* Persimmon (Diospyros kaki) fruit: hidden phytochemicals and health claims. EXCLI journal, 2015, 14, 542–561. Doi: 10.17179/excli2015-159

26. *Anjum N., Bhat A., Hameed F.* Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (Diospyros kaki L.) pulp. Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 2021, 22(39-40), 67-76.

27. *Jang I. C., Oh W. G., Ahn G. H., Lee J. H., Lee S. C.* Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit. Food science and biotechnology, 2011, 20, 71-77. Doi:10.1007/s10068-011-0010-0

28. *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.

29. *Zhou M., Chen J., Bi J., Li X., Xin G.* The roles of soluble poly and insoluble tannin in the enzymatic browning during storage of dried persimmon. Food Chemistry, 2022, 366, 130632. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632

30. *Xu Y., Liu C., Yang X., Wu K., Gong B*. Genome-wide microsatellite characterization and marker development in Diospyros oleifera. Industrial Crops and Products, 2023, 203, 117182. https://doi.org/10.3390/agriculture13050955

31. *Lalou S., Ordoudi S. A., Mantzouridou F. T.* On the effect of microwave heating on quality characteristics and functional properties of persimmon juice and its residue. Foods, 2021, 10(11), 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 https://doi.org/10.3390/foods10112650

32. *Hafizov G., Hafizov S., Hafizov R.* Processing Methods of Dried Persimmons. Preprints, 2023. doi:10.20944/preprints202309.1119.v1

33. *Kim J. H., Chung I. K., Kim H. Y., Kim K. M.* Comparison of the quality of dried persimmon (Diospyros kaki THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives. Food Science & Nutrition, 2018, 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673

34. *Kang W. W., Kim J. K., Oh S. L., Kim J. H., Han J. H., Choi J. U.* Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 2023, 33(2), 386–391. https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386

35. *Senadeera W., Adiletta G., Önal B., Di Matteo M., Russo P.* Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. Foods, 2020, 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101

36. *Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S. K., Li S. B., Liu Z. L., Wang H., Chen X.J., Xiao H. W.* Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity. Plants, 2022, 11(19), 2500. https://doi.org/10.3390/plants11192500

37. *Dağdeviren A., Acar B., Alhammadi A., Roshanaeı K., Coşkun T., İnanç Ö., Özkaymak M.* Freeze-drying of persimmon (diospyros kaki) slices investigation of drying characteristics. Politeknik Dergisi, 2021, 26(2), 487-494. https://doi.org/10.2339/politeknik.949139

38. *Polat A., Taskin O., Izli N.* Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. Journal of Food Science, 2024, V.89, Is.4, 2332-2346 https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994

39. *Borah M. S., Raj G. B., Tiwari A., Dash K. K.* Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14, 100816. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816

40. *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.).

Отримано 29.07.2025
Received 29.07.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 628.1

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНЕ ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНИЙ МЕТОД ПАРОВОГО ВИБУХУ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ЛІГНІНОВМІСНОЇ СИРОВИНИ НА БІОПАЛИВО

Ободович О.М.[1] д.т.н., **Іваницький Г.К.**[2] д.т.н., **Целень Б.Я.**[3] к.т.н., **Радченко Н.Л.**[3] к.т.н., **Гоженко Л.П.**[4] к.т.н.

[1]Інститут 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
[2]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського" пр. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, Україна, д.т.н., проф. кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв; Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-0486-2359
[3]Інститут 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
[3]Інститут 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
[4]Інститут 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/0000-0002-8999-1917

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.4

В статті представлено огляд сучасних методів попередньої підготовки малоефективної або непридатної для промислових потреб рослинної сировини для її наступного ферментативного гідролізу в технологіях виробництва біопалива. На основі проаналізованої інформації перспективним визначено метод парового вибуху, однак, складнощі пов'язані з конструктивним виконанням обладнання, суттєво стримують його подальше впровадження. Тому в якості альтернативи запропоновано простіший в реалізації метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), основні принципи якого закладено в роботі роторно-пульсаційного апарата. Проведено порівняння пропонованого методу з методом парового вибуху та визначено, що використання роторно-пульсаційного апарата дозволяє підвищити ступінь біоконверсії в 1,2…1,7 рази у порівнянні з паровим вибухом.

This article presents an overview of modern methods of pretreatment inefficient or unsuitable for industrial needs plant material for its subsequent enzymatic hydrolysis in biofuel production technologies. Based on the analyzed information, the steam explosion method is perspective, however, the difficulties associated with the design of the equipment significantly hinder its further implementation. Therefore, as an alternative, a simpler method of discrete-pulse energy input (DPEI), which is implemented in a rotor-pulsation apparatus, is proposed. The proposed method is compared with the steam explosion method and it is determined that the use of rotor-pulsation apparatus allows increasing the conversion rate by 1.2...1.7 times compared to steam explosion on the example of straw processing.

Бібліографія 30, рис. 1.

Ключові слова: паровий вибух, лігніновмісна сировина, ступінь біоконверсії, роторно-пульсаційний апарат, дискретно-імпульсне введення енергії, біопаливо.

Постановка проблеми. В умовах сучасного дефіциту природних ресурсів особливо актуальним стає питання їх раціонального використання та пошук альтернативних шляхів заміщення. Однією з потенційних можливостей вирішення цієї проблеми є переробка малоефективної чи непридатної для промислових потреб рослинної сировини до якої відносять лісові відходи, солому, листя, кукурудзиння тощо на біологічні види енергоресурсів серед яких біоетанол, біометан, біоводень [1]. Така рослинна біомаса маючи унікальні властивості, будову та склад вважається [1] не лише цінним енергетичним джерелом, хімічним компонентом, але й якісним кормовим продуктом або ж напівфабрикатом. На сьогоднішній день цей напрям є відносно новим хоча вже встиг довести свою ефективність та перспективність в США, Китаї [2]

та країнах Європи, які наразі знаходяться на етапі переходу від першого покоління, тобто виробництва біоетанолу з цукру і зерна та біодизелю з олійних культур до виробництва біопалива з целюлозної маси. Так, наприклад, протягом останніх років у США близько 4 % виробничих потужностей біоетанолу використовували целюлозну сировину, а в ЄС лише 25 млн літрів. В Україні виробництво зосереджено головним чином на біоетанолі першого покоління, де основною сировиною слугує кукурудза, меляса, цукровий буряк. Потужності у 2022 році становили близько 381 тис тон на рік, а частка целюлозного біоетанолу поки навіть не виробляється у промислових масштабах. Враховуючи, що Україна має значні обсяги такої сировини, а також з огляду на те, що у найближчій перспективі ЄС планує нарощувати споживання біоетанолу, існує значний потенціал і можливості для успішного розвитку даного напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Використання сучасних високоефективних технологічних підходів при організації цих процесів дозволить у майбутньому розвивати нові енергоефективні технології комплексної переробки рослинної сировини. Одним з потенційно можливих шляхів практичного застосування таких підходів вважається [3–5] організація попередньої обробки сировини, яка проводиться по завершенню етапу її попередньої підготовки (подрібнення, очищення, сушіння) та перед проведенням ферментативного гідролізу і бродіння. Її реалізація передбачає гідротермічну обробку основним завданням якої є розщеплення геміцелюлози на моно- та олігосахариди (пентози, гексози), а також покращення доступу до целюлози та часткове послаблення лігніну [6]. На сьогоднішній день відомо [5, 7, 8] багато методів серед яких: фізичні (механічне подрібнення, екструзія, мікрохвильова, ультразвукова обробка, піроліз, дія імпульсного електричного поля), хімічні (обробка кислотами, лугами, евтектичними розчинниками, іонними рідинами, органічна сольвентна, озоноліз), фізико-хімічні (обробка аміаком, гарячою водою, плазмою, з ефектом парового вибуху, автогідроліз тощо) та біологічна з використанням різноманітних ферментів, грибів. При цьому, не всі вони універсальні, екологічні, ефективні і доступні для реалізації у промислових масштабах. Тобто, вибір методу залежить не лише від типу сировини, але й економічних факторів. Так, з огляду [9, 10] затребуваними сьогодні вважаються метод парового вибуху, автогідроліз, використання іонних рідин, кислот, лугів, сольвентна та біологічна обробка і кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, наприклад, використання кислот вважається ефективним для всіх типів сировини, оскільки забезпечує максимально високий вихід цукрів, проте, утворення хімічних відходів, які потребують обов'язкової нейтралізації та висока вартість створює ряд складнощів при його реалізації. Використання іонних рідин, теж забезпечує високий вихід цукрів та ефективне руйнування лігніну, однак, існує складність масштабування до промислових потреб та його висока вартість. Лужна обробка реалізується в умовах дії високих температур (60…150 ºС) та присутності, наприклад, NaOH, $Ca(OH)_2$ чи NH_3. Створювані ефекти дозволяють видаляти лігнін, однак, разом з цим є менш ефективними для геміцелюлози. Використання органічного сольвентного методу передбачає обробку в присутності органічних розчинників (етанолу, метанолу, ацетону чи гліцерину) та води у поєднанні з високою температурою (150…200 ºС) і тиском 1…3 МПа. Використання органічних розчинників дозволяє ефективно розчиняти лігнін і частково геміцелюлозу, залишаючи целюлозу у вигляді твердого залишку, придатного для подальшого ферментативного гідролізу. До основних переваг методу можна віднести універсальність щодо вибору сировини, ефективне видалення лігніну та високий вихід цукрів. Якщо ж порівнювати його з методом автогідролізу або ж обробкою кислотами, то у даному випадку утворюється значно менше інгібіторів бродіння (фурфуролу, 5-ГМФ). З іншого боку через високу вартість обладнання і органічних розчинників та складність масштабування обладнання до потреб промисловості метод поки не знайшов широкого впровадження. Серед усіх перелічених методів, біологічна обробка вважається найменш ефективною та довготривалою, що відчутно обмежує її промислове застосування хоча метод екологічний та енергоощадний завдяки низькотемпературним режимам обробки (20…40 ºС). Найбільш затребуваним сьогодні можна вважати метод автогідролізу, який завдяки екологічності, простоті і невибагливості обладнання в експлуатації, успішно застосовують в країнах ЄС, США, Китаї. Для його реалізації застосовують переважно автоклави або реактори високого тиску. Під час обробки, залежно від типу сировини, в реакторі підтримується стабільною температура 160…240º С та тиск до 5 МПа без різкого скидання тиску по завершенню обробки. Системи нагрівання забезпечують подачу пари, а фільтраційні центрифуги (преси) розділяють на рідку і тверду фази. Створювані в реакторі режими дозволяють реалізувати хімічний гідроліз геміцелюлози на цукри, досягти послаблення лігніну зі збереженням структури целюлози за рахунок гарячої води. Метод показав ефективність для твердих порід, однак, у випадку необхідності тривалого підтримання температури (до

60 хвилин) можуть утворюватися небажані інгібітори, а з іншої сторони зростають енерговитрати на обробку, що теж є суттєвим недоліком у нинішніх умовах економії енергоресурсів. З огляду [11] відомо про різновид даного методу – вибуховий автогідроліз, який передбачає окрім обробки додатковий перепад тиску по завершенню процесу. Створюваний ефект дозволяє досягти ще й механічного руйнування мікроструктури волокон підвищуючи цим доступ до целюлози. Проте, отримана сировина потребує подальшого очищення перед ферментацією від фурфуролу. Близький за своїм принципом дії вважається [12] метод парового вибуху, який довів свою ефективність при обробці твердих порід сировини. Він відрізняється коротко тривалістю (1…10 хвилин) та високотемпературними режимами (180…240 ºС) обробки парою під високим тиском 1…3,5 МПа з наступним миттєвим скиданням до атмосферного. Основним ефектом такого впливу є руйнування структури, видалення геміцелюлози, часткове порушення лігніну. Його безумовна перевага у менших енерговитратах, у порівнянні з попереднім. На сьогоднішній день саме він вважається найбільш перспективним завдяки екологічності та можливості отримання волокна з високою питомою поверхнею і реакційною здатністю. Також вважається, що така попередня активація сировини сприяє інтенсифікації процесу делігніфікації, а також кислотному і ферментативному гідролізу лігноцелюлозної сировини. Разом з цим існує можливість скорочення витрати реагентів, загальних енерговитрат та потенціал для розширення номенклатури порід деревини для делігніфікації та підвищеної якості отримуваної целюлози.

Отже, проаналізувавши сучасні тенденції переходу виробництва біопалива від першого покоління до другого, коли основною сировиною стає малоефективна чи непридатна для промислових потреб рослинна сировина, а також технології і можливі шляхи підвищення їх ефективності, визначено перспективним попередню обробку сировини перед її гідролізом. Вивчивши методи, які застосовують на даному технологічному етапі виробництва, їх недоліки та умови подальшого успішного розвитку і впровадження, перспективним визначено метод парового вибуху. У зв'язку з цим, дані дослідження спрямовані на вирішення наукової проблеми в галузі розробки високоефективних технологій глибокої хімічної переробки відходів деревини і рослинної сировини з використанням методу попередньої паровибухової модифікації і отриманням цінних енергетичних продуктів серед яких біоетанол. Завданням досліджень поставлено вивчення та аналіз особливостей перебігу та реалізації методу парового вибуху в процесах біоконверсії лігноцелюлозної сировини з отриманням біопалива, проведення літературного огляду щодо наукових напрацювань у даному напрямку і експериментальне вивчення доцільності використання методу дискретно-імпульсного введення енергії (далі – ДІВЕ) як альтернативного високоефективного методу біоконверсії лігноцелюлозної сировини при виробництві біопалива у порівнянні з методом парового вибуху.

Огляд стану проблеми. Особливість реалізації процесу "парового вибуху" полягає у створенні короткотривалого високотемпературного впливу на зволожену лігноцелюлозну сировину в умовах швидкого перепаду тиску з підвищеного до атмосферного. Створювані в реакторі під час обробки умови ініціюють прискорення гідролізу геміцелюлози супроводжуючись деструкцією лігніну і зменшенням його молекулярної маси. Використання парогенератора дозволяє створити високотемпературну пару (до 240 ºС), а фільтраційні системи – відділити фракції після завершення обробки. При цьому, охолоджувальні системи забезпечують необхідну динаміку зниження температури після скидання тиску. За рахунок створюваного перепаду тиску відбувається фракціонування сировини на компоненти з наступним розділенням на рідку фазу, яка являє собою розчин моноцукрів і низькомолекулярної фракції лігніну, котрі в подальшому вилучаються екстракцією та твердий залишок целюлози і лігніну. Разом з цим перепад тиску створює ефект розширення перегрітої води і пари, який веде до руйнування клітинної структури деревини зі збільшенням питомої поверхні, утворенням водорозчинних продуктів, що містять олігомери ксилану, ксилозу та інші моносахариди, а також глюкуронову кислоту, лігнін, таніди, жирні кислоти, на що вказують відомі дослідження [13, 14]. Цими ж авторами у подальших дослідженнях доведено ефективність застосування даного методу на прикладі розщеплення волокна костри, костри коноплі і льону, а також виділення геміцелюлози, лігніну, пектинів і воску з наступною обробкою водою і 0,4 %-м розчином лугу.

Механізм перебігу процесу "парового вибуху" детально проаналізовано в роботах [15–17], зокрема, авторами показано, що зростання швидкості та скорочення тривалості процесу декомпресії веде до інтенсивного зменшення розміру частинок і збільшення питомої поверхні. Швидкий перепад тиску створюється за рахунок збільшення швидкості відкривання клапана для скидання тиску і видалення обробленої сировини. Процес супроводжується вивільненням потенціальної

енергії перегрітої рідини забезпечуючи заданий ступінь розриву частинок. Ефект зменшення розміру частинок і збільшення питомої поверхні в результаті "парового вибуху" має важливе значення при подальшому ферментативному гідролізі рослинної сировини. В роботах Гравітіса [13] та інших авторів [5, 15–18] теж вивчались теоретичні і прикладні аспекти методу "парового вибуху", а також стан проблем та технічне оснащення. В роботах [5, 18] наводиться інформація про класифікацію за режимами ведення процесу на прикладі різних типів сировини. Зокрема, для сировини з низьким вмістом лігніну авторами рекомендується температурний діапазон 160…190 ºС та тиск до 2 МПа; для соломи і листя – 190…210 ºС та тиск 1,5…2,5 МПа при 2…5 хвилинній тривалості обробки; для твердої сировини, наприклад, хвойної деревини оптимальним вважається 210…240 ºС, а тиск 2…3,5 МПа протягом 5…10 хвилин циклу обробки. Крім цього, метод класифікується [15] за видами каталізаторів, які додаються при обробці сировини, типом реактора (періодичний, безперервний), за вологістю сировини (висока – 30…50 % та низька менше 20 %). Якщо розглядати фізичну модель перебігу процесу, то вона передбачає обробку сировини в реакторі, куди на початку процесу подається нагріта водяна пара. Протягом заданого проміжку часу досягаються необхідні температура і тиск, котрі залишаються константами під час обробки. Час виходу на режим не перевищує 30 с., а обробки – близько кількох хвилин. Підвищення температури і тиску скорочує інтервал часу обробки. На останньому етапі обробки, який займає 0,1…1 с відбувається адіабатне розширення. Процес може реалізовуватись за схемою безперервної та періодичної дії. Періодична існує в кількох варіаціях, зокрема, перший включає: генератор пари, реактор та циклон з пристроєм для конденсату. Дана схема розрахована на обробку сировини при високому тиску і температурі до 250º С. За наведеною схемою працюють переважно в країнах США, Канаді та Швеції. Другий варіант схеми передбачає обробку при температурі до 200º С і тиску до 13,8 МПа з попереднім пропусканням волокнистої сировини через спеціальне сопло для того, щоб його розщепити перед адіабатним розширенням. Схема організації неперервного процесу передбачає використання реактора шнекового типу з системою безперервної подачі пари і сировини. Різниця у тому, що обробка проводиться при більш низьких температурах і тиску, що дозволяє отримувати сировину ще додатково для виробництва кормових продуктів. Безумовною перевагою методу є можливість отримання продукту, який можна легко розділити на окремі, умовно чисті компоненти. Зокрема, вилучати геміцелюлозу і пентозні цукри, які є зайвими у виробництві етанолу під час організації процесу бродіння та збільшити вихід моносахаридів С6 групи. Разом з цим досягається збільшення питомої поверхні сировини за рахунок миттєвого зниження тиску і вибухового закипання рідини всередині волокон, що веде до взаємного розщеплення волокон підвищуючи доступність клітин стінки для гідролізуючих агентів, як кислотних, так і для ферментних препаратів. Можливість підвищення реакційної здатності субстратів до гідролізу представляє значний інтерес для дослідників та створює значні перспективи для подальшого вивчення і розвитку даного напрямку в цілому. На сьогоднішній день основним стримуючим фактором є складність конструктивного виконання системи швидкого скидання тиску, високі вимоги до безпеки та організація процесу миттєвого вилучення отримуваного в результаті обробки продукту.

На думку авторів даної роботи вагомою альтернативою паровому вибуху може стати використання методу ДІВЕ, де за рахунок направленого використання створюваних ефектів є можливість підвищення реакційної здатності (ступеню біоконверсії) біомаси. Основна ідея методу ДІВЕ полягає у тому, щоб попередньо введену і довільним чином розподілену в робочому об'ємі енергію акумулювати сконцентрувавши в локальних і дискретно розподілених точках системи та в подальшому імпульсно її реалізувати для досягнення необхідних фізичних ефектів. Найбільшу ефективність метод ДІВЕ проявив [19–21] для двофазних гетерогенних систем з кількома компонентами, в т. ч. нерозчинними і з низькою інтенсивністю тепломасообмінних процесів. Для його реалізації використовуються процеси перемішування, емульгування, гомогенізації дисперсного компонента чи дисперсної фази. Тобто явище зменшення розміру включень, підвищення ступеня їх однорідності, збільшення сумарної поверхні контакту компонентів чи фаз, що є важливим показником в промислових процесах у тому числі і на етапі попередньої підготовки сировини для її наступної переробки або ж гідролізу. Використання методу ДІВЕ дозволяє створювати значні градієнти чи перепади значень тиску, швидкості, температури, концентрації густини, хімічних потенціалів, потенціалів електричного чи магнітного полів та досягти надвисоких концентрацій енергії і речовин на міжфазових поверхнях, підвищення ККД у порівнянні з традиційним обладнанням [22, 23]. Підведена енергія може бути тепловою, механічною, електричною, електромагнітною тощо. Технологія ДІВЕ може реалізовуватись в багатофазних системах чи однофазних, які можуть трансфор-

муватись під впливом ДІВЕ в багатофазні. При цьому одна з фаз повинна бути стисливою у порівнянні з іншими. Переважна більшість традиційних фізико-хімічних технологій потребує енерговитрат реалізуючись в апаратах із зовнішнім підведенням енергії. При цьому, коефіцієнт корисного підведення енергії досить низький і не перевищує 10 %. Головна проблема полягає у тому, що основний опір процесам тепломасопереносу зосереджений на обмежено малій міжфазній поверхні і саме в цю зону необхідно ввести необхідну енергію. В традиційному обладнанні енергія рівномірно розподілена по всьому об'єму, а тому її основна частина витрачається на циркуляцію взаємодіючих компонентів. Використання процесів і обладнання заснованих на принципах ДІВЕ позбавлене цих недоліків і дозволяє значно підвищити енергетичні показники процесу головним чином за рахунок реалізації ефектів енергозбереження. На сьогоднішній день метод ДІВЕ реалізується за рахунок різноманітного тепломасо-обмінного обладнання. Однак, в першу чергу застосовуються апарати роторно-пульсаційного типу (далі – РПА), які знайшли широке застосування в різних галузях промисловості [24–27], перш за все, при проведенні базових технологічних операцій. Серед основних – диспергування, перемішування, розчинення, теплова обробка, гідроліз. В якості оброблюваного середовища найбільш перспективною вважається переробка рослинної сировини і складних біологічних систем для потреб енергетики, харчової, консервної, а також фармацевтичної індустрії. При цьому, найбільшу ефективність показали апарати циліндричного типу. Їх основна особливість полягає у трьох коаксіально розміщених циліндричних елементах: двох статорів і ротора зі щілинними зазорами між ними. На поверхнях статорів і ротора паралельно осі обертання з однаковим кроком розташовано щілинні отвори однакової ширини, які взаємно перекриваються при обертанні ротора. Робота апарата створює умови для тангенціального руху рідини в кільцевих зазорах і, внаслідок, дії відцентрових сил її радіальне переміщення через щілинні отвори ротора і статорів. Під час обробки в РПА оброблювана сировина циркулює, піддаючись багатократному розриву потоку за рахунок взаємного перекриття щілин статорів ротора і статора з періодичністю порядку 2…6 кГц. Під час перекриття щілин статора поверхнею ротора, потік оброблюваної сировини в щілинних каналах статора миттєво гальмується. Час від моменту перекриття отворів до повного перекриття не перевищує 0,3 мс, повного перекриття 0,1 мс, а час розкриття отворів 0,3 мс. Цикл зміни прохідного перерізу каналу для руху сировини в радіальному напрямку повторюється кожні 0,7 мс. Тобто стадія повного розкриття каналу фактично відсутня. Під час перекриття і зумовленого цим гальмування потоку в каналах першого (внутрішнього) статора виникають високоамплітудні пульсації тиску. При цьому кінетична енергія потоку періодично трансформується в потенціальну енергію з ініціюванням явища гідравлічного удару в якості супутнього ефекту. В щілинних каналах другого статора внаслідок різкого скидання тиску під час перекриття каналу і його швидкого розкриття, періодично створюються потужні швидкодіючі ефекти вибухового закипання і кавітаційного схлопування. Частота і амплітуда цих пульсацій залежить як від швидкості обертання ротора, так і від кількості щілин та швидкості потоку всередині апарата. Рух потоку в радіальному напрямку відбувається в пульсуючому режимі. Таким чином, лінійна швидкість руху в щілинних каналах змінюється від максимуму до мінімуму. Середнє значення радіальної швидкості 0,463 м/с набагато нижче тангенціальної швидкості потоку в зазорах. Максимально можлива радіальна швидкість 1,08 м/с, що на порядок менше тангенціальної швидкості біля поверхні ротора. Наслідком невисоких значень лінійної швидкості є відносно низький рівень розвитку динамічних ефектів пов'язаних з гальмуванням і прискоренням потоку, а також супутніх ефектів гідравлічного удару. Величина прискорення в каналі I статора при перекриванні і наступному розкритті щілинних отворів становить $3{,}6 \cdot 10^3$ м/с^2. При миттєвому перекритті отворів на виході з каналів I статора в кожному з цих каналів виникає ефект гідравлічного удару. В момент повного перекриття каналу потік сировини рухається в каналі довжиною l зі швидкістю 1,08 м/с і до моменту повного перекриття каналу становить 0,3 мс., гальмуючи до значень близьких до нуля. Внаслідок цього у вихідному перерізі каналу формується імпульс високого тиску, який розповсюджується назустріч потоку до вхідного перерізу каналу зі швидкістю звуку, котра залежить від властивостей оброблюваної сировини. Через невеликий проміжок часу підвищений тиск змінюється розрідженням і протягом даного ж проміжку часу, знаходиться під низьким тиском. За час повного перекриття отвору в каналі відбувається не менше десяти осциляцій тиску. Якщо час перекриття каналу перевищує тривалість фази удару, то відбувається непрямий гідравлічний удар, для якого амплітуда імпульсу тиску залежить від співвідношення фази удару до часу закриття і становить 0,028 МПа, а частота затухаючих коливань близько 90 кГц. При середній радіальній швидкості 0,463 м/с сировина проходить щілинний ка-

нал І статора за час порядку 10 мс і за цей проміжок відбувається перекриття каналу (близько 15 разів) і, відповідно, стільки ж раз кожен елементарний об'єм піддається впливу гідравлічного удару. Хоча амплітуди пульсацій тиску при гідравлічному ударі порівняно невеликі, неперервність і висока частота цих пульсацій безумовно є визначальними при гідромеханічній обробці. Існує значна відмінність у перебігу гідродинамічних процесів в каналах зовнішнього статора (ІІ). Так, у момент суміщення щілинних отворів ротора і статора в каналі зовнішнього статора швидкість потоку максимальна. При перекритті отворів потрапляння сировини в канал статора спочатку сповільнюється, а потім фактично припиняється, так як її незначне потрапляння відбувається тільки за рахунок транзитного руху з радіального зазору між ротором і статором. Сировина, що перебуває в каналі, спрямовується до виходу з каналу, а інерційні сили створюють напруження розтягування. По мірі звільнення каналу тиск швидко знижується від нормального до тиску насиченої пари при температурі середовища, що викликає вибухове закипання в середині каналу. Протягом всього часу відбувається інтенсивне зростання бульбашок. При чому на початковій стадії швидкість росту досягає 1000 м/с. При відкриванні отвору в канал І статора надходить імпульс високого тиску, що веде до інтенсивного схлопування великої кількості бульбашок з виділенням високо амплітудного імпульсу тиску. В результаті чого за короткий проміжок часу тиск зростає до кількох атмосфер до моменту наступного перекриття отворів. Таким чином, всередині каналу ІІ статора постійно з частотою порядку 2…6 кГц відбуваються високоамплітудні коливання тиску, внаслідок чого виникає потужний гідроакустичний ефект. Кавітаційні явища, які відбуваються в каналі статора і супутні з ними фазові перетворення можна розглядати як акустичну кавітацію, шо є одним з найбільш жорстких механізмів ДІВЕ, який широко використовується з метою інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів в дисперсних середовищах. Тотожність кавітаційних процесів, які відбуваються у зовнішньому статорі РПА і явища акустичної кавітації підтверджують експериментальні дані. В роботі [28] наведено дані кавітаційного кластера, утвореного магнітострикційним випромінювачем при статичному тиску 0,2 МПа, а також охарактеризовано кавітаційний кластер в каналі статора РПА. Подібність форми і структури обох кластерів дає підставу для припущення щодо тотожності механізмів їх формування і стабілізації. Представлені дані про особливості методу ДІВЕ, механізмів і фізичних явищ, які відбуваються в робочих органах РПА, дають можливість зробити припущення про ефективність його використання в технологіях біоконверсії лігноцелюлозної сировини при отриманні біопалива. З цією метою на експериментальному стенді основою якого є описаний вище РПА, проведено комплекс досліджень з обробки рослинної сировини, оцінку його ефективності за показником ступеня біоконверсії і порівняння одержаних результатів зі зразками обробленими методом парового вибуху.

Опис експериментального стенда. Для визначення доцільності застосування пропонованого методу ДІВЕ, який реалізується в РПА передбачено його порівняння з методом парового вибуху на прикладі обробки соломи. Критерій оцінювання – реакційна здатність (ступінь біоконверсії) лігноцелюлозної біомаси.

Під час експерименту обробку сировини проводили в РПА з наступними конструктивними характеристиками: кількість щілинних отворів на поверхні ротора (статора) 30 шт., об'ємна витрата сировини, яку піддавали обробці $1 \cdot 10^{-3}$ м/с; кутова швидкість обертання ротора 47,5 об/с; тангенціальна швидкість внутрішньої поверхні ротора 8,9 м/с; тангенціальна швидкість зовнішньої поверхні ротора 9,53 м/с.; усереднене значення тангенціальної швидкості ротора 9,54 м/с, час обробки в режимі рециркуляції – 20…50 хвилин при 2000…5000 об/хв. Гідромодуль для обробки соломи в РПА становив 10:1, що відповідає 10 кг розчину з 0,1 % NaOH на 1 кг сухої соломи. Обробку проводили при температурі сировини 20 ºС. Для статичної достовірності експерименти повторювали тричі. Для контролю використовували необроблені зразки соломи. Одержані результати ступеня біоконверсії соломи порівнювали з даними літературних джерел [29, 30] ступеня біоконверсії соломи обробленої методом парового вибуху (при аналогічних режимах). У першому випадку дані порівнювали з літературними при обробці у присутності H_2SO_4, у другому – у присутності $Ca(OH)_2$, у третьому порівнювали з експериментальними при обробці в РПА – в присутності NaOH.

Результати. Отримані результати експериментальних досліджень та дані літератури для порівняння [28, 29] наведено на діаграмі 1.

Одержані результати свідчать, що у порівнянні з методом парового вибуху обробка в РПА дозволяє досягти найбільшого ступеня біоконверсії (61 %), причому, незалежно від виду застосованого реагента. Одержаний ефект можна пояснити комбінацією впливу механічної, гідродинамічної та кавітаційної дії спрямованої на руйнування структури оброблюваної сировини та підвищення

Рис. 1. Реакційна здатність (ступінь біоконверсії) зразків соломи, що пройшли попередню обробку різними методами та контрольний зразок необробленої соломи

Fig. 1. Reactivity (degree of bioconversion) of straw samples pretreated with different methods and a control sample of untreated straw

її реакційної здатності. Створювані в РПА механічні ефекти дозволяють досягти зменшення розміру часток до 0,1…1 мм, що збільшує площу міжфазної поверхні. Мікровибухи, спричинені кавітацією, призводять до розриву лігноцелюлозної матриці підвищуючи пористість, а гідродинамічний вплив, зумовлюючи високошвидкісні потоки рідини, сприяє видаленню частини геміцелюлози та модифікації лігніну. Сукупний вплив усіх цих процесів дозволив покращити показник ступеня біоконверсії, а невисока температура обробки не створює ризику утворення небажаних інгібіторів та дозволяє уникнути деградації цукрів. Подібні ефекти неможливо реалізувати при використанні методу парового вибуху навіть при підвищенні рівня питомих енерговитрат.

Одержані результати показали можливість підвищення ефективності попередньої обробки лігноцелюлозної сировини на прикладі соломи для її наступного гідролізу за рахунок використання РПА в якому реалізовано принципи методу ДІВЕ.

Висновки. Проаналізовано існуючі методи попередньої підготовки сировини перед проведенням її гідролізу та визначено, що найбільш перспективним на сьогодні є паровий вибух. Проаналізовано особливості та складності пов'язані з перебігом і реалізацією даного процесу та на їх основі визначено, що основна проблема полягає у складності конструктивного виконання обладнання, яке має забезпечити практично миттєве видалення отриманого після парового вибуху продукту. Існування даного фактору суттєво стримує широке впровадження, а тому як альтернативу запропоновано більш простий в реалізації метод ДІВЕ, основні принципи якого закладено в роботі РПА. Проведено порівняння пропонованого методу з методом парового вибуху. Оцінювання результатів за ступенем біоконверсії показало, що використання РПА, який реалізує ефекти ДІВЕ дозволяє підвищити ступінь біоконверсії (реакційну здатність), на прикладі обробки соломи, обробленої в лужному середовищі в 1,2…1,7 рази у порівнянні з паровим вибухом. Зокрема, обробка в РПА дозволила досягти 61 % (в присутності NaOH), а обробка з використанням парового вибуху (в присутності $Ca(OH)_2$) – 36 % та 49 % (в присутності H_2SO_4).

В подальшому пропоноване обладнання може використовуватись в технологіях виробництва біопалива, однак, потребує додаткових досліджень для визначення оптимальних умов ведення процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *L. Zhao, Z. Sun, C. Zhang, J. Nan, N. Ren, D. Lee, C. Chen.* Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives. Bioresource Technology. 2022. Vol. 343. P. 126123 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123

2. *L. Zhao, X. Zhang, J. Xu, X. Ou, S. Chang, M. Wu.* Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic biomass in china: dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. Energies. 2015. 8(5). P. 4096-4117 https://doi.org/10.3390/en8054096

3. *Шульга С. М., Тігунова О. О., Блюм Я. Б.* Лігноцелюлоза як альтернативна сировина для отримання біобутанолу. Біотехнологія. 2013. Т. 6(2). С. 9-20. http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000037729

4. *E. Ximenes, C. Farinas, Y. Kim, M. Ladisch.* Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production. Hydrothermal Processing in Biorefineries. 2017. P. 181-205 https://doi.org/10.1007/978-3-319-56457-9_7

5. *P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, M.J. Negro* pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review Bioresource Technology. 2010. Vol. 101(13). 2010. P. 4851-4861 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093

6. *N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Lee, M. Holtzapple, M. Ladisch* Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass Bioresource Technology 2005. Vol. 96(6). P. 673-686 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025

7. *V. Balan, B. Bals, S. Chundawat, D. Marshall, B. Dale.* Lignocellulosic biomass pretreatment using AFEX Methods Mol Biol. 2009. Vol.581. P. 61-77 https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_5

8. *R. Ravindran, A. Jaiswal* A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and Opportunities. Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 92-102 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106

9. *T. Scapini, M. Santos, C. Bonatto, j. Wancura, J. Mulinari, A. Camargo, N. Klanovicz, G. Zabot, M. Tres, G. Fongaro,* H. Treichel Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. Bioresource Technology. 2021.Vol. 342. P. 126033 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033

10. *M. Yiasmin, A. Waleed, X. Hua.* Methods for pretreatment of lignocellulosic biomassand by-products for lignocellulolytic enzymes modification: a review. International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2021. Vol. 7(1). P. 102-143 https://doi.org/10.51193/IJAER.2021.7108 11. О. Тігунова, Н. Бейко, Д. Каменських, Т. Ткаченко, В. Євдокименко, В. Кашковський, С. Шульга Лігноцелюлозна біомаса після вибухового автогідролізу як субстрат для отримання бутанолу «Biotechnologia Acta». 2016. Т. 9. № 4. С. 28-34 https://doi.org/10.15407/biotech9.04.028

12. *T. Pielhop, J. Amgarten, M. Studer & Philipp Rudolf von Rohr.* Pilot-scale steam explosion pretreatment with 2-naphthol to overcome high softwood recalcitrance Biotechnology for Biofuels. 2017. 10(130). P.1-13 https://doi.org/10.1186/s13068-017-0816-y

13. *Gravitis, Y.* (1987). Theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of plant biomass. Wood Chemistry. (5). 321.

14. *Raushenberg N., Dhara K., Palmer J., Glasser W.* Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic resources – structure and properties. American chemical society polymer preprints, division of polymer chemistry. 1990. Vol. 31(1). P. 650-652 https://palmoilis.mpob.gov.my/publications/OPB/opb39-jalani.pdf

15. *Jacquet N.,* et al. Influence of steam explosion on physicochemical properties and hydrolysis rate of lignocellulosic biomass. Bioresources. 2015. 10(3). P. 4611–4627 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.073

16. *Pielhop T., Amgarten J., von Rohr, P.R.* et al. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. Biotechnol Biofuels. 2016. 9. 152. P. 1-13 https://doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1

17. *I. Ziegler-Devin, L. Chrusciel, N. Brosse.* Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Frontiers in Chemistry. 2021. 9. P.705358 https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358

18. *A. Kumar, S. Sharma.* Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review Bioresour. Bioprocess. 2017. Vol. 4. P.1-19 https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9

19. *Долінський А., Коник А., Радченко Н., Целень Б., Гоженко Л.* Перспективність та розвиток апаратури принцип роботи заснований на механізмах дискретно-імпульсного підведення енергії. Теплофізика і теплоенергетика. 2017. 39(5). С.7-11 https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01

20. *Гоженко Л., Іваницкий 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). С. 47–62 https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008

21. *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

22. *Dolinskiy A.A., Nakorchevskiy A.I., Basok B.I.* Specifics of Processing Pastes in Rotary-Pulse Eguipment. Industrial Heat Engineering. 2001. 3. №3-4. P. 12-16

23. *Долінський А.А., Басок Б.І.* Дискретно-імпульсна трансформація енергії в адіабатно закипаючому потоці. Промислова теплотехніка. 2001. №4-5. С. 5-20

24. *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. P. 215-221 https://doi.org/10.54740/ros.2023.021

25. *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 https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22

26. *Іваницкий Г., Целень Б., Радченко Н.* Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. Наукові праці. Т.86(1). С. 11-16 https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2396

27. *Ободович О., Целень Б., Саблій Л., Радченко Н., Недбайло А*. Сучасні технології водопідготовки для теплоенергетики. Теплофізика та теплоенергетика. 2025. Т. 47. №1. С. 80-88 https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/618/539

28. *Ivanytskyi G., Tselen B., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N.* Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Physics of aerodisperse systems. 2023. №61. P. 227-240 https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236

29. *Chen J., Bian Y., Wu Z., Li X., Wang T., Lv G.* Accumulation Rule of Sugar Content in Corn Stalk, Plants. 2023. 12(6). P. 1373. https://doi.org/10.3390/plants12061373

30. *Shukla A., Kumar D., Girdhar M., Kumar A., Goyal A., Malik T., Mohan A.* Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2023. №16. P. 1-33 https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2

DISCRETE-PULSE ENERGY INPUT AS ALTERNATIVE METHOD OF STEAM EXPLOSION FOR PROCESSING LIGNIN-CONTAINING RAW MATERIALS INTO BIOFUELS

Obodovych O.[1], Ivanytskyi G.[2], Tselen B.[3], Radchenko N.[4], Gozhenko L.[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]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteiskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, D.Sc., Professor Department of Machines and Apparatuses for Chemical and Oil Refining Industries; Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Dr of Sc, Leading Researcher, https://orcid.org/0000-0002-0486-2359
[3]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
[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/0000-0002-8999-1917

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.4

The article analyzes the current trends in the transition of biofuel production from the first generation to the second, when the main raw material is inefficient or unsuitable for industrial needs, as well as technologies and possible ways to increase their efficiency. The preliminary processing of raw materials before their enzymatic hydrolysis and fermentation has been identified as promising. Methods applied at this technological stage of production, their disadvantages, and the conditions for their further successful implementation have been analyzed. The steam explosion method was identified as the most perspective. It was also found that the main limiting factor for its further industrial implementation is the complexity of designing equipment capable of ensuring the nearly instantly removal of the product obtained after the steam explosion. Therefore, as an alternative, a method of discrete-pulse energy input, which is simpler to implement, has been proposed, the fundamental principles of which are incorporated into the operation of a rotor-pulsation apparatus. The structural features and operating principles of the proposed apparatus are described in detail, and it is demonstrated that the effects produced cannot be replicated using the steam explosion method, even with an increase in specific energy consumption. By comparing the proposed method with the steam explosion method, it established that the use of a rotor-pulsation apparatus increases the conversion degree by 1.2 to 1.7 times compared to steam explosion on the example of straw processing. The obtained results confirm the feasibility and appropriateness of using the discrete-pulse energy input method and rotor-pulsation apparatuses based on it for the pretreatment of lignocellulosic raw materials (e.g., corn stalks) prior to hydrolysis. In the future, the proposed equipment can be utilized in technologies for producing second-generation biofuels.

References 30, figures 1;

Key words: steam explosion, lignin-containing raw material, conversion rate, rotor-pulsation apparatus, discrete-pulse energy input, biofuel.

1. *L. Zhao, Z. Sun, C. Zhang, J. Nan, N. Ren, D. Lee, C. Chen.* Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives Bioresource Technology. 2022. Vol. 343. P. 126123 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123

2. *L. Zhao, X. Zhang, J. Xu, X. Ou, S. Chang, M. Wu.* Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic biomass in china: dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. Energies. 2015. 8(5). P. 4096-4117 https://doi.org/10.3390/en8054096

3. *Shulga S. M., Tigunova O. O., Blume Y. B.* Lihnotseliuloza yak alternatyvna syrovyna dlia otrymannia biobutanolu. [Lignocellulose as an alternative source for obtaining of butanol]. Biotekhnolohiia [Biotechnol. acta.] 2013. 6 (2). P. 9–21 http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000037729 (In Ukr.)

4. *E. Ximenes, C. Farinas, Y. Kim, M. Ladisch.* Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production. Hydrothermal Processing in Biorefineries. 2017. P. 181-205 https://doi.org/10.1007/978-3-319-56457-9_7

5. *P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, M.J. Negro* pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review Bioresource Technology. 2010. Vol. 101(13). 2010. P. 4851-4861 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093

6. *N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Lee, M. Holtzapple, M. Ladisch* Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass Bioresource Technology 2005. Vol. 96(6). P. 673-686 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025

7. *V. Balan, B. Bals, S. Chundawat, D. Marshall, B. Dale.* Lignocellulosic biomass pretreatment using AFEX Methods Mol Biol. 2009. Vol.581. 61-77 https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_5

8. *R. Ravindran, A. Jaiswal* A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and Opportunities. Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 92-102 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106

9. *T. Scapini, M. Santos, C. Bonatto, j. Wancura, J. Mulinari, A. Camargo, N. Klanovicz, G. Zabot, M. Tres, G. Fongaro, H. Treichel* Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. Bioresource Technology. 2021.Vol. 342. P. 126033 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033

10. *M. Yiasmin, A. Waleed, X. Hua*. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomassand by-products for lignocellulolytic enzymes modification: a review. International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2021. Vol. 7(1). P. 102-143 https://doi.org/10.51193/IJAER.2021.7108

11. *O. Tigunova, N. Baiko, D. Kamenensky, Tkachenko, V. Evdokimenko, V. Kashkovsky, S. Shulga* Lignocellulosica biomassa post explosivum autohydrolisum ut substratum ad obtinendum butanolum [Lignocellulosic biomass after explosive autohydrolysis as substrate to butanol obtaining] «Biotechnologia Acta». 2016. Vol. 9(4). P. 28-34 https://doi.org/10.15407/biotech9.04.028 (In Ukr.)

12. *T. Pielhop, J. Amgarten, M. Studer & Philipp Rudolf von Rohr*. Pilot-scale steam explosion pretreatment with 2-naphthol to overcome high softwood recalcitrance Biotechnology for Biofuels. 2017. 10(130). P. 1-13 https://doi.org/10.1186/s13068-017-0816-y

13. *Gravitis, Ya.A.* (1987). Theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of plant biomass. Wood Chemistry. (5). 321

14. *Raushenberg N. Dhara K., Palmer J., Glasser W.* Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic resources – structure and properties. American chemical society polymer preprints, division of polymer chemistry. 1990. Vol. 31(1). P. 650-652 https://palmoilis.mpob.gov.my/publications/OPB/opb39-jalani.pdf

15. *Jacquet, N.,* et al. Influence of steam explosion on physicochemical properties and hydrolysis rate of lignocellulosic biomass. Bioresources. 2015. 10(3). P. 4611–4627 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.073

16. *Pielhop T., Amgarten J., von Rohr, P.R.* et al. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. Biotechnol Biofuels. 2016. 9. 152 P. 1-13 https://doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1

17. *I. Ziegler-Devin, L. Chrusciel, N. Brosse.* Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Frontiers in Chemistry. 2021. 9. P.705358 https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358

18. *A. Kumar, S. Sharma.* Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review Bioresour. Bioprocess. 2017. Vol. 4. P. 1-18 https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9

19. *A. Dolinskiy, A. Konyk, N. Radchenko, B. Tselen, L. Gozhenko* Perspektyvnist ta napriamky rozvytku aparativ, pryntsyp roboty yakykh gruntuietsia na mekhanizmakh dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii. [Perspectiveness and development of apparatus the principle of work is based on the mechanisms of discrete-pulse energy input]. Thermophysics and thermal power engineering. 2017. 39(5). P.7-11 https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01 (In Ukr.)

20. *L. Gozhenko, H. Ivanytskyi, A. Lymar, V. Sydorenko, B. Tselen., N. Radchenko O. Obodovych* (2021). Dyskretno-impulsne vvedennia enerhii v tekhnolohiiakh pidhotovky vody. [Discrete-pulsed energy input in water treatment technology]. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1 (sua19-01). P. 47–62 https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008 (in Ukr.)

21. *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. P. 123-130 https://doi.org/10.2298/APT2253123O

22. *Dolinskiy A.A., Nakorchevskiy A.I., Basok B.I.* Specifics of Processing Pastes in Rotary-Pulse Eguipment. Industrial Heat Engineering. 2001. 3. №3-4. P. 12-16

23. *Dolinskiy A.A., Basok B.I.* Dyskretno-impulsna transformatsiia enerhii v adiabatno zakypaiuchomu pototsi. [Discrete-pulse energy transformation in an adiabatically boiling flow]. Promyslova teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering]. 2001. №4-5. P. 5-20 (in Ukr.)

24. *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, P. 215-221 https://doi.org/10.54740/ros.2023.021

25. *Tselen B., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N.* Optymizatsiia protsesu vodopidhotovky dlia vidnovlennia sokiv za dopomohoiu hidrodynamichnoi kavitatsii. [Optimization of the water treatment process for juice recovery using hydrodynamic cavitation] Prodovolchi resursy. [Food resources] 2024. Vol. 12(23) P. 189-198 https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22 (in Ukr.)

26. *Ivanytskyi G., Tselen B., Radchenko N*. Vikoristannya gidrodinamichnoyi kavitaciyi dlya pidvishennya efektivnosti procesukristalizaciyi laktozi v molochnij sirovatci [Use of hydrodynamic cavitation to increase the efficiency of the lactose crystallization process in milky whey]. Naukovi praci. [Scientific Works] V.86(1). P. 11-16 https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2396 (In Ukr.)

27. *Obodovych O., Tselen B., Sabliy L., Radchenko N., Nedbailo A.* Suchasni tehnologiyi vodopidgotovki dlya teploenergetiki [Modern water treatment technologies for thermal power engineering]. Teplofizika ta teploenergetika [Thermophysics and Thermal Power Engineering] 2025. Vol. 47(1). P. 80-88 https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/618/539 (In Ukr.)

28. *Ivanytskyi G., Tselen B., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N.* Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Physics of aerodisperse systems. 2023. №61. P. 227-240 https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236

29. *Chen J., Bian Y., Wu Z., Li X., Wang T., Lv G.* Accumulation Rule of Sugar Content in Corn Stalk, Plants. 2023. 12(6), P. 1373. https://doi.org/10.3390/plants12061373

30. *Shukla A., Kumar D., Girdhar M., Kumar A., Goyal A., Malik T., Mohan A.* Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2023. №16. P. 1-33 https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2

Отримано 28.06.2025
Received 28.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 621.565:536.48:004.94

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХОЛОДИЛЬНИКІВ З ЕФЕКТОМ ДЖОУЛЯ–ТОМСОНА

Круковський П.Г.[1], Ткач В. М.[2]

[1]докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, зав. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях ІТТФ НАНУ, професор, orcid.org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net
[2]аспірант, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях ІТТФ НАНУ, orcid.org/0009-0002-1949-4496, e-mail: tkachtkach1@gmail.com

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.5

Розглянуто принцип роботи, конструкцію та існуючу математичну модель мікрохолодильників (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона для охолодження мікроелектроніки і інфрачервоних датчиків. Принцип роботи ефекту Джоуля-Томсона полягає в адіабатному охолоджуванні потоку газу при різкому розширенні після проходження через дросель. Організація противоточного теплообміну між прямим стислим потоком газу до дроселя і охолодженим розширеним після дроселя може досягати криогенних температур. Останні десятиріччя були присвячені вибору конструкції таких МКХ, а також розвитку математичних моделей і комп'ютерних програм з метою вибору оптимальних параметрів цих конструкцій. В роботі на прикладі мініатюрного мікрохолодильника зі спіральною капілярною трубкою з ребрами, соплом, оправою та сосудом Дьюара розглядається існуюча двовимірна модель термогазодинамічного стану мікрохолодильників з робочим газом азот і пропонується більш точна тривимірна математична і комп'ютерні моделі, що і є новизною роботи.

The principle of operation, design and existing mathematical model of microrefrigerators (MCRs) with the Joule-Thomson effect for cooling microelectronics and infrared sensors are considered. The principle of operation of the Joule-Thomson effect is the adiabatic cooling of the gas flow during its sharp expansion after passing through the throttle. The organization of countercurrent heat exchange between the direct compressed gas flow to the throttle and the cooled expanded gas flow after the throttle can reach cryogenic temperatures. The last decades have been devoted to the choice of the design of such heat exchangers and the development of mathematical models and computer programs in order to select the optimal parameters of these structures. In the work, using the example of a miniature microrefrigerator with a spiral capillary tube with ribs, a nozzle, a frame, and a Dewar vessel, the existing two-dimensional model of the thermogasodynamic state of microrefrigerators with nitrogen as the working gas is considered and a more accurate three-dimensional mathematical and computer model is proposed, which is the novelty of the work.

Бібл. 6, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: мікрохолодильники, ефект Джоуля-Томсона, моделювання.

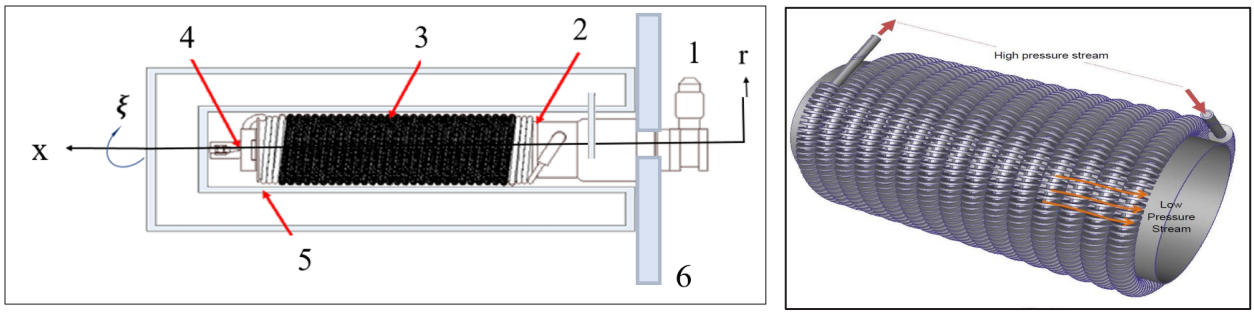
Вступ

Мікрохолодильники (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона призначені для швидкого охолодження компонентів та речовин у стіснених умовах. Ці пристрої мають циліндричні форми і малі розміри (3-15 мм в діаметрі і 3-10 см довжиною), вагою до 20 грам, короткий час захолодження (до 10 секунд) і високу стабільність роботи протягом тривалого часу [1]. Часто їх використовують для охолодження мікроелектроніки, , в медицині, а також в космічній і оборонній техніці. Особливо важливу роль вони відіграють для охолодження до кріогенних температур інфрачервоних датчиків розмірами до 10 мм з тепловиділенням до 1,5 Вт.

Принцип роботи та конструкція мікрохолодильника

Принцип роботи ефекту Джоуля-Томсона полягає в адіабатному охолоджуванні потоку газу при різкому розширенні після проходження через дросель. Організація противоточного теплообміну між прямим стислим потоком газу до дроселя і зворотним охолодженим і розширеним після дроселя може досягати криогенних температур [1]. Принципова схема такого мікрохолодильника з сосудом Дьюара показна на рис.1,а, де через штуцер 1 газ високого тиску подається в спірально намотану на оправу 2 оребрену капілярну трубку 3, яка є основною частиною теплообмінника, більш детально показаного на рис.1,б [2] . На прикладі азоту, (як робочого газу високого тиску від 10 до 40 МПа) при кімнатній температурі потік проходить через дросель 4, розширюється (до 0,5 атм), охолоджується (потенційно до 60 К) і повертається через зовнішню поверхню оребреної поверхні теплообмінника в зворотному напрямку і виходить назовні. При цьому він охолоджує прямий потік високого тиску, який проходить через середню частину капілярної трубки і внутрішню частину стінки сосуда Дьюара 5.

Більш детальна схема мікрохолодильника наведена на рис. 2. [3] Робочий газ високого тиску надходить через штуцер подачі газу високого тиску 1 в ребристий капіляр, і далі тече спірально всередині цього оребреного капіляра на оправі 5. На виході з капіляра потік розширюється ізоентальпійно через отвір до нижчого тиску. Зниження тиску при постійній ентальпії призводить до зниження температури. Газ після ізоентальпійного розширення через сопло 10 між газом високого і низького тиску. Газ низького тиску та низької температури потрапляє в теплообмінник через кільцевий отвір між оправкою та внутрішньою частиною стінки сосуда Дьюара (тут не показаний). Потік газу низького тиску тече у зустрічному/поперечному напрямку з потоком з боку труби, навколо ребристого капіляра, між ребрами та охолоджує потік з боку труби. Вихід потоку низького тиску відводиться через штуцер 2. Найбільш холодною є порожнина 8 розширення потоку після сопла 10, де і розташовані датчик або електронна схема 9



а б

Рис. 1. Принципова схема мікрохолодильника з сосудом Дьюара (а) і циліндричною оправою з спірально намотаною оребреною капілярною трубкою (б). На рис. а: 1 – штуцер для подачі газа високого тиску, 2 – оправа холодильника, 3 – оребрена капілярна трубка; 4 – сопло, 5 – стінки сосуда Дьюара, 6 – кріплення мікрохолодильника з сосудом Дьюара [2]

Figure 1. Schematic diagram of a microrefrigerator with a Dewar vessel (a) and a cylindrical frame with a spirally wound finned capillary tube, mounting a microrefrigerator with a Dewar vessel (b). In Fig. a: 1 – high-pressure gas supply fitting, 2- refrigerator frame, 3 – finned capillary tube; 4 – nozzle, 5 – Dewar vessel walls, 6 – mounting a microrefrigerator with a Dewar vessel [2]

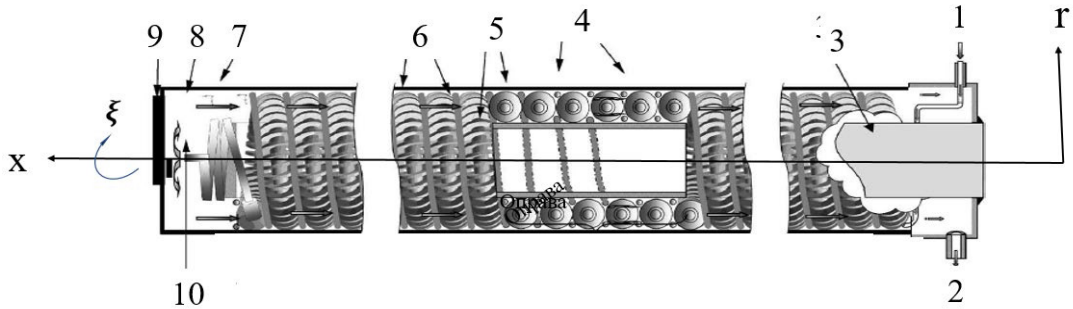


Рис. 2. Детальна схема мікрохолодильника. 1 – штуцер подачі газу високого тиску, 2 – штуцер відводу потоку низького тиску, 3 – оправа, 4 – локальний розріз холодильника, 5 – спіральна котушка з оребреною капілярною трубкою на оправі, 6 – ребра спіральної котушки, 7 – зворотній напрямок потоку газу низького тиску, 8 – порожнина розширення потоку після сопла, 9 – датчик або електронна схема, 10 – сопло між газом високого і низького тиску

Figure 2. Detailed diagram of a microrefrigerator. 1 - high-pressure gas supply fitting, 2 - low-pressure flow outlet fitting, 3 - frame, 4 - local section of the refrigerator, 5 - spiral coil with finned capillary tube on the frame, 6 - fins of the spiral coil, 7 - reverse direction of low-pressure gas flow, 8 - flow expansion cavity after the nozzle, 9 - sensor or electronic circuit, 10 - nozzle between high and low pressure gas

Середні розміри загальних і окремих частин мікрохолодильників наведено в табл.1, що показує наскільки вони мініатюрні.

Характеристика холодопродуктивності таких МКХ є теж мала і лежить в діапазоні 1-4 вата і залежить від рівня тиску на вході в МКХ, а швидкість його охолодження (самоохолодження), сягає декілька секунд. Робоча температура МКХ залежить від типу робочого тіла, наприклад, азот для досягнення рівня -196 °С. Для забезпечення мінімальних витрат робочого тіла в МКХ існує дросельний мікроклапан, який саморегулюється в залежності від температури робочого тіла за соплом.

Останні десятиріччя були присвячені вибору наведених вище конструкції МКХ, а також розвитку математичних моделей і комп'ютерних програм з метою вибору оптимальних параметрів цих конструкцій. Моделювання різноманітних конструкцій МКХ стало важливим інструментом дослідження і оптимізації параметрів термогазодинамічного стану МКХ, враховуючи середні розміри і окремі частин МКХ (див. табл. 1), в той час як експериментальні дослідження є набагато складнішими.

Виходячи з назви цієї роботи на прикладі мініатюрного мікрохолодильника зі спіральною капілярною трубкою з ребрами, соплом, оправою та сосудом Дьюара нижче серед низки моделей [1-4] розглядається існуюча типова двовимірна модель термогазодинамічного стану МКХ з Дьюаром [4], яка не враховує градієнти температур в радіальному напрямку r (рис.1 і 2), **що є певною проблемою** при моделюванні.

Метою роботи є доповнення існуючої двовимірної математичної моделі до рівня більш точної тривимірної моделі для твердих деталей ИКХ, а також застосування сучасних комп'ютерних технологій реалізації моделей, що є **новизною роботи**.

Розрахункові моделі мікрохолодильників

Сучасне розрахункове моделювання будь-яких об'єктів складається з наступних 4-х етапів: розробка ***геометричної, фізичної, математичної і комп'ютерної*** моделей.

Геометрична типова модель мініатюрного мікрохолодильника, розміщеного в сосуді Дьюара, показана в системі координат X, r і ξ на рис.1,а і 2. В моделі дрібна геометрія діаметра капілярної трубки і ребра на ній представляється як тонкі коаксіальні щілини, по середній із яких тече газ високого тиску, а по щілинам зверху і низу його в зворотному напрямку тече газ низького тиску. Геометрія сопла, датчика або електронна схема враховуються теж.

Фізична модель мініатюрного мікрохолодильника, розміщеного в сосуді Дьюара словами описує усі термогазодинамічні процеси як всередині приладу, що розглядається, так і взаємодії цих процесів з оточуючим середовищем як в стаціонарному, так і не стаціонарному режимі. Тут важливо правильно задати значення всіх фізичних параметрів всередині приладу, так і на його поверхнях.

Математична модель по суті описує фізичну модель диференціальними і алгебраїчними математичними рівняннями, які потенційно дозволяють кількісно розраховувати параметри термогазодинамічних процесів приладу. Рівняння цих моделей розраховують аналітичними і чисельними методами. Математична модель (1) - (11) мікрохолодильника з сосудом Дьюара розглядається нижче.

Таблиця 1. Середні розміри загальних і окремих частин МКХ [2]

Table 1. Average sizes of common and individual parts of the MCC[2]

Геометричний параметр	***Розмір, мм***
Діаметр одного витка по осі капіляра	4,07
Внутрішній діаметр капіляра	0,3
Зовнішній діаметр капіляра	0,5
Крок намотки труби	0,95
Кількість витків	42
Висота оребрення	0,2
Крок оребрення	0,132
Товщина оребрення	0,08
Загальний діаметр мікрохолодильника	***5,0***
Загальна довжина мікрохолодильника	***52,0***
Кількість ребер на один оберт капіляра	55 шт.

Комп'ютерна модель по суті реалізує математичну модель фізичних процесів, а саме, в зручному вигляді кількісно приймає вихідні лані для розрахунків і видає результати розрахунків параметрів термогазодинамічних процесів приладу. Наразі існує низка потужних і готових комп'ютерних програм (середовищ) [5-6], які дозволяють реалізовувати широкий спектр фізичних і математичних моделей, в тому числі мікрохолодильники з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків.

Типова математичзична модель мікрохолодильників

Нижче наведена типова нестаціонарна математична модель МКХ [4], що описує всі фізичні процеси, що протікають в мініатюрному мікрохолодильнику, розміщеному в в сосуді Дьюара, але не враховує тепловий стан важливих частин кріплення Дьюара і датчика, що суттєво впливає на температуру цього датчика.

Газ високого тиску

Рівняння нерозривності (1), імпульсу (2) та енергії (3) для газу високого тиску, що тече вздовж спірального напрямку оребреної трубки, ξ (рис.1), записано так

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial \xi} = 0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u u}{\partial \xi} = -\frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{2 f \rho u^2}{d_h}, \tag{2}$$

$$\rho A_l \left[C_p \frac{\partial T_h}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_p T_h}{\partial \xi} + \frac{\partial (u^2/2)}{\partial \xi} \right] = -h_l (\pi d_l)(T_h - T_i), \tag{3}$$

де τ-час, m – масова витрата; ρ – густина; u – швидкість газу; P – тиск газу; f – коефіцієнт тертя потоку газу; d – внутрішній діаметр каналу; A – площа поперечного перерізу потоку газу; Ср – питома теплоємність газу; T – температура; h – коефіцієнт тепловіддачі, а нижні індекси h та і позначають газ високого тиску та поверхню трубки,.

Коефіцієнт тертя газу та тепловіддачі для газу високого тиску розраховується за емпіричним рівнянням.

Газ низького тиску

Рівняння нерозривності (4), імпульсу (5) та енергії (6) для газу низького тиску вздовж поздовжнього напрямку холодильника x записано так

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho u u}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2 f \rho u^2}{d_l}, \tag{5}$$

$$\rho A_l \left[C_p \frac{\partial T_l}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_p T_l}{\partial x} + \frac{\partial (u^2/2)}{\partial x} \right] = \\ = -h_l A_{p,l} (T_l - T_i) - h_f A_{p,f} (T_l - T_f), \tag{6}$$

де Ар позначає кільцеву площу потоку; dl – гідравлічний діаметр проходу; а нижні індекси l, f, m та d позначають газ низького тиску, ребро, оправу та сосуд Дьюара відповідно. Коефіцієнт тертя газу низького тиску розраховується за емпіричним рівнянням [8], а коефіцієнт тепловіддачі – за емпіричним рівнянням для ряду труб.

Спіральна трубка і ребра

Енергетичне рівняння для одношарової спіральної трубки та ребра вздовж спірального напрямку можна записати так

$$m_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = k_t A_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial \xi^2} + h_h A_{p,ti} (T_h - T_i) + \\ + h_l A_{p,to} (T_l - T_t) + 2 \frac{k_t k_f}{k_f W_f + k_t t_t} W_f L_f (T_t - T_f) \tag{7}$$

де m – маса; k – теплопровідність; W – ширина ребра; t – товщина ребра; L – довжина ребра; а нижній індекс ti позначає внутрішню та зовнішню сторони.

Оправа

Оправка охолоджується газом низького тиску вздовж зовнішньої поверхні, а внутрішня поверхня вважається адіабатичною. Тому рівняння енергії (8) вздовж осьового напрямку записується так

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = k_m A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + h_l A_{p,m} (T_l - T_m), \tag{8}$$

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = k_m A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \boldsymbol{A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2}} + h_l A_{p,m} (T_l - T_m), \tag{8a}$$

Сосуд Дьюра

Сосуд Дьюара знизу охолоджується газом низького тиску вздовж внутрішньої поверхні, а зовнішня поверхня має конвективний і радіаційний теплообмін, що визначається за формулою (9)

$$m_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial \tau} = k_d A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} + h_l A_{p,d} (T_l - T_d) + \\ + h_r (\pi d_{do}) \left(T_d^4 - T_{amb}^4 \right), \tag{9}$$

$$m_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial \tau} = k_d A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} + \boldsymbol{A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial r^2}} + h_l h_l A_{p,d}(T_l - T_d) + \\ + h_r(\pi d_{do})\left(T_d^4 - T_{amb}^4\right), \quad (9a)$$

де h_r – коефіцієнт радіаційного теплообміну; **a** - нижній індекс, **amb** – температура навколишнього середовища.

Сопло

Масова витрата m без зміни ентальпії H через сопло записується як

$$\dot{m} = C_d \sqrt{\gamma P_{nz} \rho_{nz} A_{nz} \left[\frac{2}{\gamma} + 1\right]^{\frac{(\gamma+1)0,5}{\gamma-1}}}, \quad H_{out} = H_{in}, \quad (10)$$

де Cd – коефіцієнт протікання сопла; γ –теплоємність газу; H – ентальпія; a нижній індекс nz позначає сопло.

Термодинамічні властивості робочого тіла газу (наприклад азоту) знаходяться окремо із чисельних джерел.

Таким чином аналіз моделі (1)-(10) показує, що автори не враховують тепловий стан важливих масивних частин приладу, а саме штуцер подачі газу високого тиску і кріплення Дьюара з мікрохолодильником (рис1,а, позиції 1 і 6) а також найбільш холодного лівого подвійного торця Дьюара з датчиком (рис.1,а і 2), що суттєво впливає на температуру датчика, самого МКХ і його холодовиробництво. В цих місцях градієнти температур і теплові потоки значні і направлені вздовж осі r (рис. 1 і 2), але вони не враховуються в моделі (1)-(10), яка по суті є двовимірною (тільки осі X і , ξ) і це її недолік. Автори цієї роботи доповнили існуючу двовимірну модель до рівня більш точної тривимірної моделі шляхом заміни рівнянь (8) і (9) на рівняння (8,а) і (9,а), в яких другі додатки на темному фоні вже враховують всі градієнти температур і теплові потоки. Доречі, рівень теплових притоків через штуцер і кріплення Дьюара в в сам Дюар і МКХ складає більше 50% від загального холодовиробництва МКХ. Кількісні розподіли температур, теплових потоків і холодовиробництво МКХ в приладі типу рис.1 і 2 автори планують досліджувати надалі.

Розглянуті математичні моделі фізичних процесів не використовують сучасні комп'ютерні технології для моделювання термогазодинамічних процесів. Наразі існує низка потужних і готових комп'ютерних програм (середовищ) [5-6], які дозволяють реалізовувати широкий спектр фізичних і математичних моделей, в тому числі мікрохолодильники з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків. Серед таких технологій є так звана польова CFD технологія, в рамках якої об'єкт розбивається на велику кількість розрахункових комірок і одержує детальний розподіл величин фізичних процесів (рис. 3, поз. 1). Є також так звана вузлова технологія, в рамках якої в об'єкті виділяється певна кількість розрахункових вузлів, в яких розраховуються значення фізичних величин процесів (рис. 3, поз. 3).

CFD технологія дозволяє аналізувати детальний розподіл величин фізичних процесів окремо взятих об'єктів, в той час як вузлова технологія дозволяє одночасно аналізувати фізичні процеси довільної кількості об'єктів. Обидві технології можливо об'єднувати між

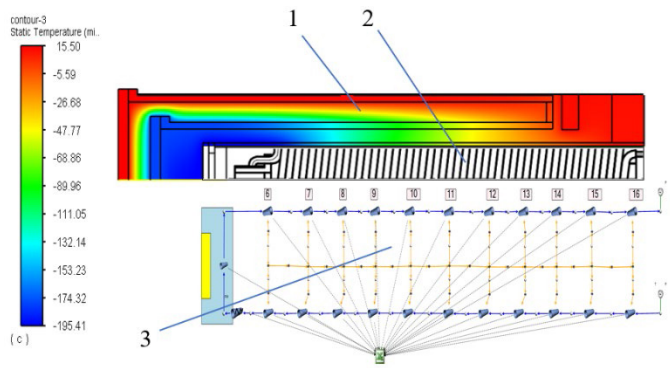


Рис. 3. Комп'ютерна модель мікрохолодильника з сосудом Дьюара: 1 – сосуд Дьюара виконаний в рамках CFD технології в комп'ютерному середовищі ANSYS CFD, 2 – рисунок мікрохолодильника, 3 – комп'ютерна модель мікрохолодильника, виконана в рамках вузлової технології в середовищі FlOWNEX SE

Figure 3.– Computer model of a microrefrigerator with a Dewar vessel: 1 - Dewar vessel made within the framework of CFD technology in the ANSYS CFD computer environment, 2 - drawing of a microrefrigerator, 3 - computer model of a microrefrigerator made within the framework of nodal technology in the FlOWNEX SE environment

собою для створення так званих гібридних моделей, яка також показана на рис. 3, де модель сосуду Дьюара виконаний в рамках CFD технології (рис. 3, поз. 1), а модель МКХ виконана в рамках вузлової технології (рис. 3, поз. 3), що дозволяє врахувати всі особливості МКХ з сосудом Дьюара. Це буде теж показано в подальших роботах авторів.

Висновки

1. Розглянуто принцип роботи і конструкцію мікрохолодильників (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона для охолодження мікроелектроніки і інфрачервоних датчиків. Виходячи із мініатюрних розмірів самого МКХ (3-15 мм в діаметрі і 3-10 см довжиною) і окремих частин (долі мм) теплообмінника формулюється висновок, що сучасне моделювання є важливим інструментом детального аналізу термогазодинамічного стану МКХ з сосудом Дьюара і оптимізації їх параметрів.

2. Розглядається існуюча двовимірна модель термогазодинамічного стану МКХ з сосудом Дьюара, яка не враховує тепловий стан штуцера подачі газу і кріплення Дьюара з мікрохолодильником і подвійного торця Дьюара, що суттєво впливає на температуру датчика, самого МКХ і його холодовиробництво.

3. Пропонується більш точна тривимірна математична і комп'ютерна модель, що дозволяє врахувати тепловий стан перерахованих вище частин приладу.

4. Розглянуті комп'ютерні технології і комп'ютерні програми (середовищ), які дозволяють реалізовувати фізичні і математичні моделі для аналізу і оптимізації параметрів МКХ з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Maytal, B.-Z., Pfotenhauer, J. M.* Miniature Joule-Thomson Cryocooling Principles and Practice. New York: Springer Science+Business Media, 2013, 380 p. (International Cryogenics Monograph Series).

2. *Hong, Y. J. et al.* Transactions of the cryogenic engineering conference–cec: Advances in Cryogenic Engineering. Tucson (Arizona), 2010. Available: https://doi.org/10.1063/1.3422265.

3. *Chua, H. T., Wang, X., Teo, H. Y.* A numerical study of the Hampson-type miniature Joule–Thomson cryocooler. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, pp. 582–593.

4. *Hong, Y.-J., Park, S.-J., Choi, Y.-D.* A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator. International Cryocoolers Conference Inc., Boulder, CO, 2010, pp. 379-386.

5. *ANSYS FLUENT* 14.0. Documentation. Available: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm (accessed 15.07.2025).

6. *Flownex SE* 2021. Documentation. Available: https://flownex.com/resources/ (accessed 21.03.2025).

MODELING OF MICRO REFRIGERATORS WITH THE JOLE–THOMSON EFFECT

P.G. Krukovsky[1] ,V.M. Tkach[2]

[1]Dr. Sci. (Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine), Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, Professor, orcid. org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net
[2]Postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, orcid.org/0009-0002-1949-4496, e-mail: tkachtkach1@gmail.com

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.5

The principle of operation and design of microrefrigerators (MRCs) with the Joule-Thomson effect for cooling microelectronics and infrared sensors are considered. The organization of countercurrent heat exchange between a direct compressed gas flow to the throttle and a cooled expanded gas flow after the throttle can reach cryogenic temperatures. The last decades have been devoted to the choice of the design of such MRCs, as well as the development of mathematical models and computer programs to select the optimal parameters of these designs. Based on the miniature dimensions of the MRC itself (3-15 mm in diameter and 3-10 cm in length) and individual parts (fractions of mm) of the heat exchanger. The cooling capacity characteristic of such MRCs is also small and lies in the range of 1-4 watts and depends on the pressure level at the MRC inlet, and the rate of its cooling (self-cooling) reaches several seconds. The operating temperature of the MRC depends on the type of working fluid, for example, nitrogen to reach the level of -196 °C. To ensure minimum working fluid consumption in the MCC, there is a throttle microvalve, which is self-regulating depending on the temperature of the working fluid behind the nozzle. It is concluded that modern modeling is an important tool for detailed analysis of the thermo-gas-dynamic state of the MCC with a Dewar vessel and optimization of their parameters. The cooling capacity characteristic of such MCCs is also small and lies in the range of 1-4 watts and depends on the pressure level at the inlet to the MCC, and the rate of its cooling (self-cooling) reaches several seconds. The operating temperature of the MCC depends on the type of working fluid, for example, nitrogen to reach the level of -196 °C. To ensure minimum working fluid consumption in the MCC, there is a throttle microvalve, which is self-regulating depending on the temperature of the working fluid behind the nozzle. Thus, the miniaturization of the MCC and the Dewar vessel leads to the conclusion that the possibility of modeling various MCC designs has become an important tool for studying and optimizing the parameters of the thermogas-dynamic state of the MCC, taking into account the average dimensions and individual parts of the MCC, while experimental studies are much more complicated. Based on the title of this work, using the example of a miniature microrefrigerator with a spiral capillary tube with ribs, a nozzle, a frame and a Dewar vessel, the existing typical two-dimensional model of the thermogas-dynamic state of the MCC with a Dewar is considered, which does not take into account temperature gradients in the radial direction, which is a certain problem in modeling. The aim of the work was to supplement the existing two-dimensional mathematical model to the level of a more accurate three-dimensional model to take into account solid parts of the MCC, as well as the use of modern computer technologies for implementing models, which is the novelty of the work. The authors of this work have supplemented the existing two-dimensional model to the level of a more accurate three-dimensional model by adding differential components along the radial axis of the model to take into account all temperature gradients and heat flows, which also significantly affect the overall refrigeration of the MCC. The application of computer technology for modeling the thermo-gasodynamic processes of a microrefrigerator with a Dewar vessel for cooling microcircuits and sensors, namely field CFD and nodal technology for creating both separate and so-called hybrid models, is also considered.

References 6, figures 3, table 1.

Key words: microrefrigerators, Joule-Thomson effect, simulation.

1. *Maytal, B.-Z., Pfotenhauer, J. M.* Miniature Joule-Thomson Cryocooling Principles and Practice. New York: Springer Science+Business Media, 2013, 380 p. (International Cryogenics Monograph Series).

2. *Hong, Y. J.* et al. Transactions of the cryogenic engineering conference–cec: Advances in Cryogenic Engineering. Tucson (Arizona), 2010. Available: https://doi.org/10.1063/1.3422265.

3. *Chua, H. T., Wang, X., Teo, H. Y.* A numerical study of the Hampson-type miniature Joule–Thomson cryocooler. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, pp. 582–593.

4. *Hong, Y.-J., Park, S.-J., Choi, Y.-D.* A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator. International Cryocoolers Conference Inc., Boulder, CO, 2009, pp. 379-386.

5. *ANSYS FLUENT* 14.0. Documentation. Available: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm (accessed 15.07.2025).

6. *Flownex SE* 2021. Documentation. Available: https://flownex.com/resources/ (accessed 21.03.2025).

Отримано 30.07.2025
Received 30.07.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 536.24:621.184.5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИМОВИХ ТРУБ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК З СИСТЕМАМИ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

Фіалко Н.М.[1], Навродська Р.О.[2], Жученко І.М.[3], Шевчук С.І.[4], Гнєдаш Г.О.[5]

[1]член-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.net
[2]канд. 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.net
[3]аспірант, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@gmail.com
[4]канд. 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.com
[5]канд. 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.3.2025.6

Наведено результати досліджень щодо ефективності використання для антикорозійного захисту залізобетонної димової труби сміттєспалювального котла методу зменшення теплових втрат з її корпусу за умов модифікації труби шляхом теплоізоляції або розміщення вставного газовідвідного ствола. Встановлено закономірності зміни основних тепловологісних показників в гирлі труби з вказаними модифікаціями у разі застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах. Показано, що сумісне застосування розглянутих методів забезпечує надійну експлуатацію димової труби при коефіцієнті витрат теплоти на реалізацію методів, що не перевищує 1 % утилізованої теплоти.

The results of studies on the effectiveness of using the method of reducing heat losses from the hull of a reinforced concrete chimney of a waste incineration boiler when modifying it by thermal insulation or placing an insertion gas-exhaust pipe for the corrosion protection are presented. The regularities of changes in the main thermal and humidity indicators in the chimney mouth with the specified modifications when using the air method of preventing condensate formation in gas exhaust ducts were established. It is shown that the combined application of the studied methods ensures reliable operation of the chimney with a heat consumption coefficient for the methods implementation not exceeding 1% of the recovered heat.

Бібл. 15, рис. 7.

Ключові слова: димові труби, теплові методи, запобігання конденсатоутворенню, ефективність захисту від корозії.

t – температура, °С;
X – вологовміст, г/кг с.г.;
σ – частка підмішуваного повітря, %;
γ – коефіцієнт витрат теплоти на реалізацію методу, %.

Індекси:
вх –вхід;
г – гази;
нс – навколишнє середовище;
пов – поверхня;
р – роса.

Вступ

Димові труби є кінцевою ланкою багатьох важливих технологічних процесів, які реалізуються в паливоспоживальних установках різного типу. Вихід з експлуатації цих димарів, як правило, призводить до зупинки всього виробництва, що зумовлює великі фінансові втрати. Тому від надійності, міцності та довговічності димових труб залежить безперебійна робота основного устаткування. Димові труби сміттєспалювальних установок призначенні для виконання тих же функцій, що і аналогічні споруди інших промислових та енергетичних об'єктів і їм притаманні спільні проблеми експлуатації.

Під час експлуатації димових труб в їхніх конструкціях накопичуються дефекти і пошкодження, які зрештою можуть призвести до остаточного руйнування труб і необхідності заміни [1-3]. Однією з причин пошкодження цих димарів є відхилення від проєктного режиму експлуатації, зокрема і через конденсатоутво-

рення на внутрішніх поверхнях [4-6]. Серед факторів, що посилюють руйнування димових труб шляхом недотримання проєктних умов їхньої експлуатації, є використання теплоутилізаційних технологій, які призводять до суттєвого зниження температури димових газів і зменшення їх швидкості у трубах [7-9].

Для антикорозійного захисту газовідвідних трактів паливоспоживальних установок та, зокрема, димових труб застосовують різноманітні заходи [10-13]. До них належать заходи, спрямовані на підвищення антикорозійних властивостей корпусів газоходів та димових труб, а також заходи, пов'язані зі створенням тепловологісної обстановки на внутрішній поверхні газовідвідних трактів, що запобігає конденсатоутворенню на цих поверхнях. У разі застосування теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів в газоспоживальних котельних установках для відвернення конденсатоутворення в димарях застосовують теплові методи тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації. Дослідження ефективності застосування трьох таких методів для сміттєспалювального котла [14] показало, що запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби досягається лише при використанні двох методів: підігрівання охолоджених в системі теплоутілізації газів у спеціальному теплообміннику-газопідігрівачі та повітряного методу. Результати досліджень показали також, що застосування вказаних методів забезпечує відсутність конденсатоутворення в режимах котла, близьких до номінальних. Тому робота стосовно розроблення заходів щодо забезпечення нормативного тепловологісного стану експлуатації димових труб в усіх режимах котла є актуальною.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні ефективності заходів щодо запобігання конденсатоутворенню в димових трубах сміттєспалювального опалювального котла за умов застосування технології глибокого охолодження димових газів.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання:

- дослідити ефективність використання для запобігання кондесатоутворенню в димовій трубі теплового методу зменшення теплових втрат з корпусу труби при її модифікації шляхом теплоізоляції або розміщення вставного газовідвідного ствола;

- встановити закономірності зміни основних тепловологісних показників в гирлі модифікованих труб за умов використання повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах.

Методика проведення досліджень.

Використовувались відомі методи теплового розрахунку котельних установок та димових труб, а також результати власних досліджень теплообміну [15] при глибокому охолодженні димових газів, які застосовувались і в [14].

Розрахункові дослідження виконувались, як і в роботі [14], для опалювального котла з продуктивністю спалювання твердих побутових відходів 5 т/год, оснащеного комбінованою системою утилізації теплоти відхідних димових газів з використанням утилізованої теплоти для попереднього нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води перед надходженням цих теплоносіїв до котла (рис. 1). Температура та вологовміст димових газів за котлом становили 200 ÷ 250 °С та 0,15 ÷ 0,25 кг/кг с.г. відповідно. Відносне теплове навантаження котла змінювалось в діапазоні 100 – 40 % відповідно до зміни температури навколишнього середовища від -20 до +10 °С. За результатами виконаних теплових розрахунків встановлено, що завдяки використанню пропонованої теплоутилізаційної системи ККД котла підвищується на 6–8 %. Температура димових газів після їх теплоутилізації змінювалась в межах 84–52 °С, а температура нагріваного у повітронагрівачі системи теплоутилізації повітря від 140 до 200 °С в залежності від режиму котла [14].

Визначалися також тепловологісні показники (температура поверхні $t_{пов}$ та точка роси $t_р$) в гирлі димової труби лише з залізобетонною оболонкою та модифікованої труби з теплоізоляцією (або вставним газовідвідним стволом). Для модифікованих димових труб розглядалося застосування повітряного методу, який полягає у підмішуванні в гази після теплоутилізації частки σ нагрітого в системі теплоутилізації повітря, що забезпечує зниження точки роси газоповітряної суміші, а також підвищення температури цієї суміші перед надходженням її у димову трубу. Частка σ є відношенням обсягу підмішуваного повітря до обсягу димових газів. Необхідною умовою безпечної експлуатації тракту (за відсутності конденсатоутворення) було дотримання в гирлі димової труби умови $t_{пов} \geq t_р$.

Розраховувався також коефіцієнт витрат теплоти γ на реалізацію повітряного методу, який є відношенням витрат теплоти на підігрівання частки σ підмішуваного повітря до максимального обсягу утилізованої теплоти (без застосування методу).

При виконанні досліджень розглядалася залізобетонна димова труба висотою 120 м, внутрішнім діаметром 1,8 м, товщиною оболонки 0,16 м. У разі теплоізоляції корпусу труби теплоізоляційним

матеріалом слугував універсальний та ефективний утеплювач: полотно з мінеральної вати з базальтового волокна (λ = 0,038 Вт/(м•°С); δ = 50 мм) ТУ 5284-048-00110473-2001. За умов монтування в трубу вставного газовідвідного ствола повітряний прошарок між залізобетонною оболонкою і металевим стволом становив 0,2 м.

Результати.

Розглянемо, насамперед, показники тепловологісного стану: точку роси $t_р$ та температуру внутрішньої $t_{пов}$ поверхні, в гирлі модифікованих димових труб (з теплоізоляцією та вставним стволом) за різних режимів експлуатації сміттєспалювального котла з пропонованою системою теплоутилізації без використання повітряного методу. На рис. 2, 3 наведено відповідні результати. Як видно, застосування теплового методу зменшення втрат теплоти з поверхні корпусу димової труби в навколишнє середовище дещо поліпшує тепловологісний режим її експлуатації, але не забезпечує відвернення випадення конденсату в гирлі вказаних труб в усіх режимах їх експлуатації. Так запобігання конденсатоутворенню реалізується лише за від'ємних температур атмосферного повітря, тобто за великих теплових навантажень котла, для усіх розглянутих температур та вологовмістів відхідних димових газів.

Проаналізуємо тепер ефективність сумісного використання для запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби двох методів (зменшення теплових втрат з поверхні корпусу труби та повітряного методу). Графіки рис. 4, 5 ілюструють характерні результати розрахункових досліджень щодо тепловологісних показників в гирлі модифікованої труби з одним шаром теплоізоляції в різних режимах її експлуатації та за різних параметрів димових газів на вході в пропоновану систему теплоутилізації.

За результатами виконаних розрахунків витрати теплоти на реалізацію повітряного методу для відвернення випадення конденсату в гирлі розглянутої димової не перевищують 1 % утилізованої теплоти.

Отже, аналіз виконаних досліджень свідчить про хорошу результативність сумісного використання двох розглянутих методів у всіх режимах експлуатації установки спалювання твердих побутових відходів. Для запобігання конденсатоутворенню у гирлі залізобетонної теплоізольованої димової труби достатньо використання одного шару вибраної теплоізоляції. При цьому частка підмішуваного повітря не перевищує 5 %.

На рис 6, 7 наведено аналогічні тепловологісні показники в гирлі модифікованої залізобетонної димової труби зі вставним газовідвідним стволом для сміттєспалювальної установки з водогрійним котлом та комбінованою системою теплоутилізації димових газів у разі підмішування до охолоджених димових газів нагрітого повітря.

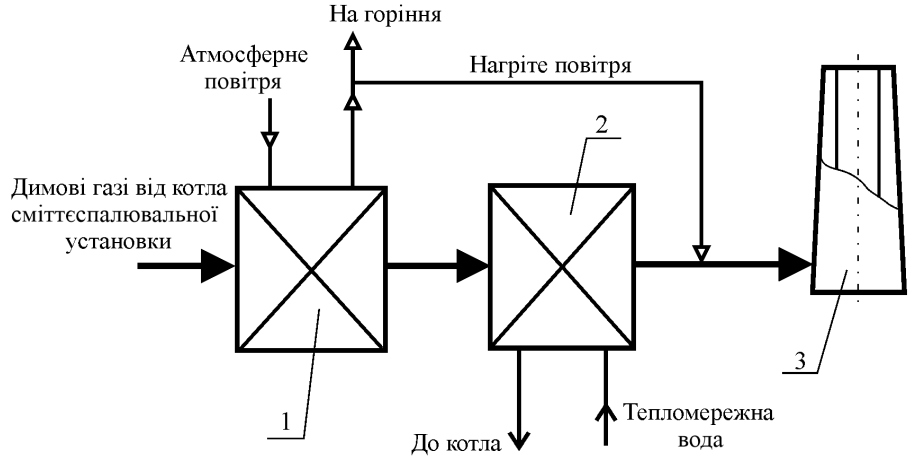
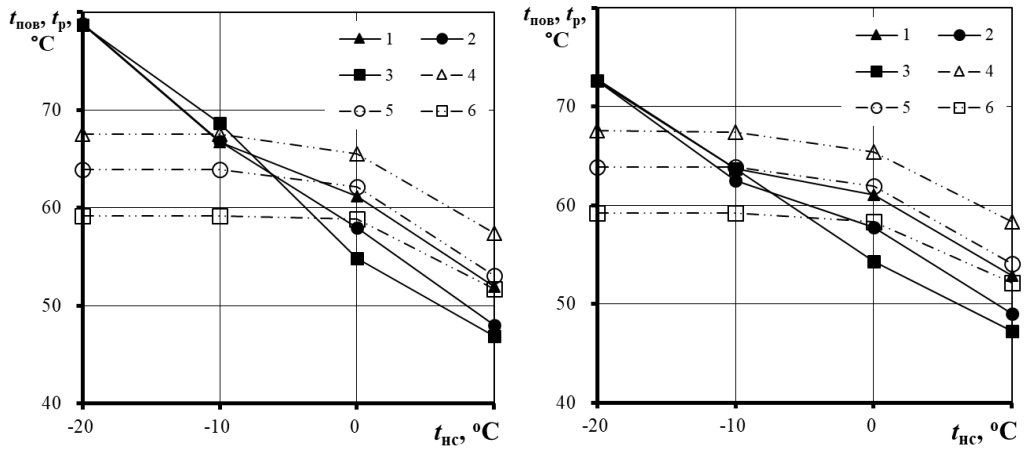


Рис. 1. Сумісне використання повітряного методу та методу зменшення теплових втрат в навколишнє середовище для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті котла з комбінованою системою теплоутилізації: 1 – повітронагрівач; 2 – водопідігрівач; 3- димова труба теплоізольована або зі вставним стволом.

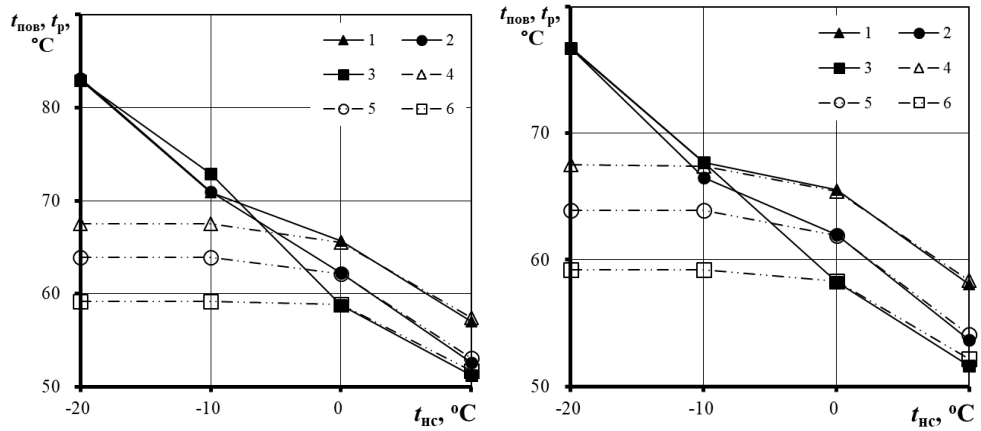
Fig. 1. Combined use of the air method and the method of reducing heat losses to the environment to prevent condensation in the gas exhaust duct of a boiler with a combined heat recovery system: 1 – air heater; 2 – water heater; 3 – thermally insulated chimney or with an insertion pipe.



а) *б)*

Рис. 2. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-3) і точки роси $t_р$ (4-6) за різних температур $t^г_{вх}$ і вологовмісту $X_{вх}$ димових газів після котла у разі застосування систем теплоутилізації та теплоізоляції труби:
а) $t^г_{вх}$ = 250 °С; б) $t^г_{вх}$ = 200 °С; 1, 4 – $X_{вх}$ = 250 г/кг с.г.; 2, 5 – $X_{вх}$ = 200 г/кг с.г.; 3, 6 – $X_{вх}$ = 150 г/кг с.г.

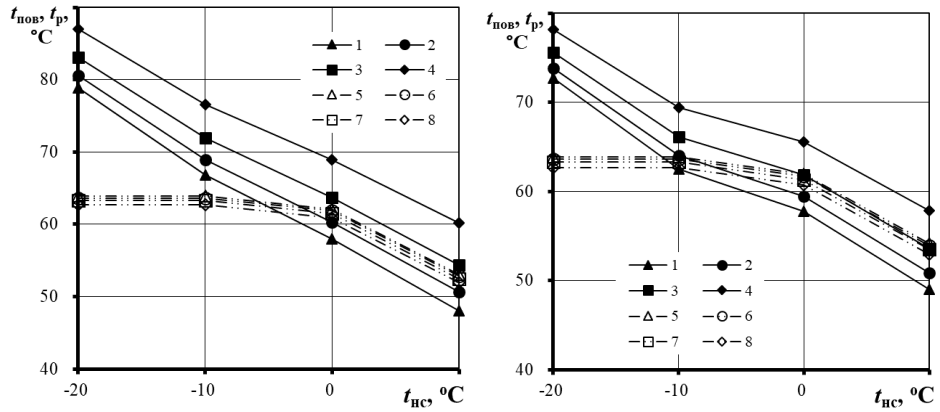
Fig. 2. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s at the chimney mouth (1-3) and the dew point t_{dp} (4-6) at different temperatures t^g_{in} and moisture content X_{in} of exhaust gases after the boiler in the case of using heat recovery systems and chimney insulation:
a) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 4 – X_{in} = 250 g/kg d.g.; 2, 5 – X_{in} = 200 g/kg d.g.; 3, 6 – X_{in} = 150 g/kg d.g.



а) *б)*

Рис. 3. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-3) і точки роси $t_р$ (4-6) за різних температур $t^г_{вх}$ і вологовмісту $X_{вх}$ димових газів після котла у разі застосування систем теплоутилізації та розміщення в трубі вставного ствола:
а) $t^г_{вх}$ = 250 °С; б) $t^г_{вх}$ = 200 °С; 1, 4 – $X_{вх}$ = 250 г/кг с.г.; 2, 5 – $X_{вх}$ = 200 г/кг с.г.; 3, 6 – $X_{вх}$ = 150 г/кг с.г.

Fig. 3. Dependence on the ambient temperature tamb of the inner surface temperature ts at the chimney mouth (1-3) and the dew point tdp (4-6) at different temperatures tgin and moisture content Xin of exhaust gases after the boiler in the case of using heat recovery systems and placement of an insertion pipe in the chimney:
a) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 4 – X_{in} = 250 g/kg d.g.; 2, 5 – X_{in} = 200 g/kg d.g.; 3, 6 – X_{in} = 150 g/kg d.g.



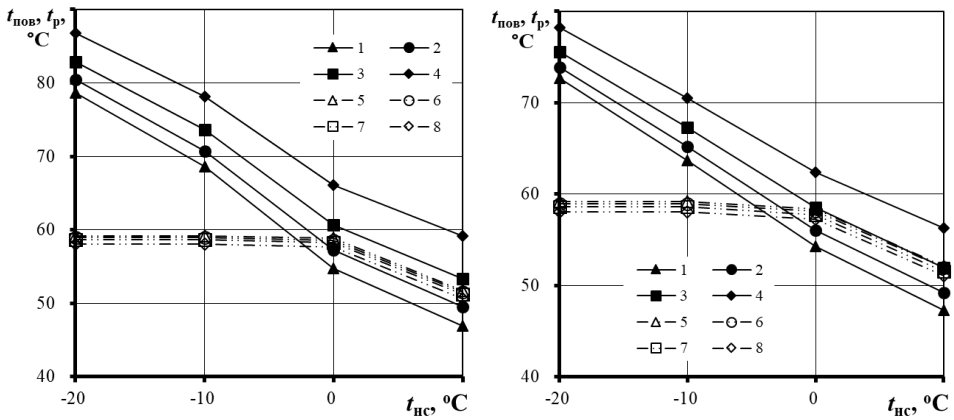
а) *б)*

Рис. 4. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі теплоізольованої димової труби (1-4) і точки роси $t_р$ (5-8) за різних температур $t^г_{вх}$ та вологовмісті 200 г/кг с.г. димових газів після котла та часток підмішуваного повітря σ:

а) $t^г_{вх}$ = 250 °C; б) $t^г_{вх}$ = 200 °C; 1, 5 – σ = 0%; 2, 6 – 2%; 3, 7 – 5%; 4, 8 – 10%.

Fig. 4. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s at the mouth of a heat-insulated chimney (1-4) and the dew point t_{dp} (5-8) at different temperatures t^g_{in} and moisture content of 200 g/kg d.g. of exhaust gases after the boiler and particles of admixed air σ:

a) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 5 – σ = 0%; 2, 6 – 2%; 3, 7 – 5%; 4, 8 – 10%.



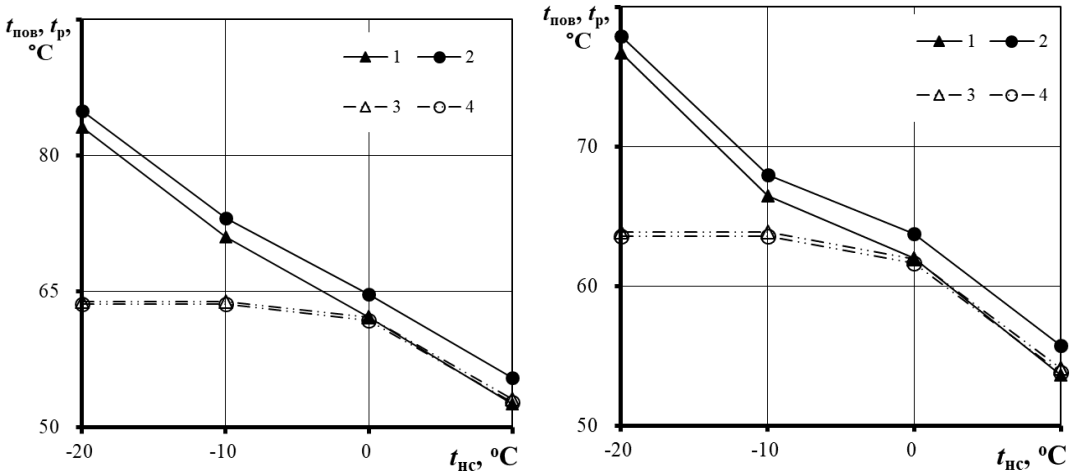
а) *б)*

Рис. 5. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі теплоізольованої димової труби (1-4) і точки роси $t_р$ (5-8) за різних температур $t^г_{вх}$ та вологовмісті 150 г/кг с.г. димових газів після котла та часток підмішуваного повітря σ:

а) $t^г_{вх}$ = 250 °C; б) $t^г_{вх}$ = 200 °C; 1, 5 – σ = 0%; 2, 6 – 2%; 3, 7 – 5%; 4, 8 – 10%.

Fig. 5. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s at the mouth of a heat-insulated chimney (1-4) and the dew point t_{dp} (5-8) at different temperatures t^g_{in} and moisture content of 150 g/kg d.g. of exhaust gases after the boiler and particles of admixed air σ:

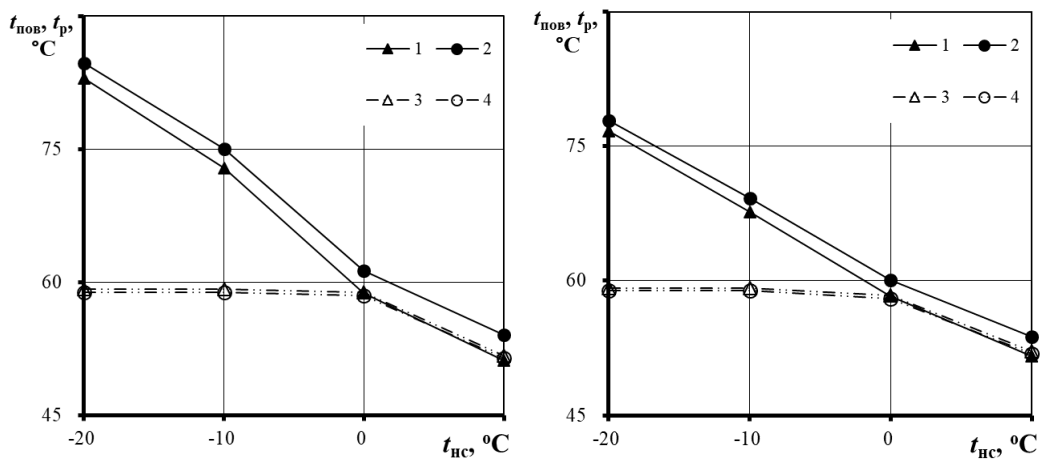
a) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 5 – σ = 0%; 2, 6 – 2%; 3, 7 – 5%; 4, 8 – 10%.



а) *б)*

Рис. 6. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби зі вставним стволом (1, 2) і точки роси $t_р$ (3, 4) за різних температур $t^г_{вх}$ та вологовмісті 200 г/кг с.г. димових газів після котла та часток підмішуваного повітря σ:
а) $t^г_{вх}$ = 250 °C; б) $t^г_{вх}$ = 200 °C; 1, 3 – σ = 0%; 2, 4 – 2%.

Fig. 6. Dependence on the ambient temperature tamb of the inner surface temperature ts at the chimney mouth with an insertion pipe (1, 2) and the dew point tdp (3, 4) at different temperatures tgin and moisture content of 200 g/kg d.g. of exhaust gases after the boiler and particles of admixed air σ:
а) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 3 – σ = 0%; 2, 4 – 2%.



а) *б)*

Рис. 7. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби зі вставним стволом (1, 2) і точки роси $t_р$ (3, 4) за різних температур $t^г_{вх}$ та вологовмісті 150 г/кг с.г. димових газів після котла та часток підмішуваного повітря σ:
а) $t^г_{вх}$ = 250 °C; б) $t^г_{вх}$ = 200 °C; 1, 3 – σ = 0%; 2, 4 – 2%.

Fig. 7. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s at the chimney mouth with an insertion pipe (1, 2) and the dew point t_{dp} (3, 4) at different temperatures t^g_{in} and moisture content of 200 g/kg d.g. of exhaust gases after the boiler and particles of admixed air σ:
а) t^g_{in} = 250 °C; b) t^g_{in} = 200 °C; 1, 3 – σ = 0%; 2, 4 – 2%.

Отримані результати свідчать, що використання повітряного методу в комплексі з розміщенням в залізобетонній трубі вставного газовідвідного ствола з утворенням повітряного прошарку між основною трубою і вставним стволом також забезпечує запобігання конденсатоутворенню в гирлі цієї труби у всіх режимах розглянутого котла. При цьому максимальна частка підмішуваного повітря має лише дещо перевищувати 2 %. За цих умов розрахований коефіцієнт витрат теплоти γ на реалізацію повітряного методу є не більшим за 1 %.

Отже, за результатами виконаних досліджень за умов використання розглянутих варіантів сумісного використання теплових методів, а саме повітряного та зменшення теплових втрат в навколишнє середовище з поверхні залізобетонної димової труби, реалізується безпечний режим її експлуатації в усіх режимах розглянутого сміттєспалювального котла, оснащеного комбінованою системою теплоутилізації димових газів.

Висновки.

1. Виконано розрахункові дослідження щодо ефективності використання для антикорозійного захисту залізобетонної димової труби сміттєспалювального опалювального котла з системою теплоутилізації методу зменшення теплових втрат з корпусу труби. Показано, що цей метод у разі модифікації труби шляхом її зовнішньої теплоізоляції або використання вставного газовідвідного стола не забезпечує відвернення конденсатоутворення в гирлі димової труби у всіх режимах експлуатації. Запобігання конденсатоутворенню реалізується лише за від'ємних температур навколищнього середовища для усіх розглянутих температур та вологовмістів відхідних газів котла;

2. Встановлено закономірності зміни показників тепловологісного стану (точки роси $t_р$ та температури внутрішньої $t_{пов}$ поверхні в гирлі димової труби) за різних режимів експлуатації сміттєспалювального котла у разі сумісного використання двох теплових методів, а саме: повітряного методу та методу зменшення теплових втрат в навколишнє середовище (шляхом теплоізолювання корпусу димової труби чи монтування в неї вставного газовідвідного ствола). За результатами аналізу вказаних показників показано, що у разі використання двох методів реалізується безпечна експлуатація димової труби в усіх режимах котла з комбінованою системою теплоутилізації. При цьому частка підмішуваного повітря σ не перевищує 5 %, а коефіцієнт витрат теплоти γ на реалізацію повітряного методу є не вищим за 1 %.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Burada C. O.* Degradation at the industrial dispersion and waste gas chimneys. Case study. Metalurgia International, 2011. no 16(1), P. 92.

2. *Корсун В. И.* О предупреждении аварийных ситуаций на промышленных дымовых и вентиляционных трубах. Будівельні конструкції. 2014. № 81. С. 244–253.

3. *Яворська О. І.* Методика оцінки залишкового ресурсу цегляних димових труб з урахуванням фактичного технічного стану. Проблеми розвитку міського середовища. 2011. № 5 (6). С. 277–284.

4. *Яровий С. М.* Типологія дефектів та пошкоджень металевих димових і вентиляційних труб, статистичний аналіз пошкоджуваності. Науковий вісник будівництва. 2020. № 99.1. С. 213–221.

5. *Корсун В. И., Губанов В. В.* О состоянии промышленных дымовых и вентиляционных труб в Украине и мерах по обеспечению их эксплуатационной надежности. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2003. № 2. С. 19–22.

6. *Яровой С. Н.* Долговечность и остаточный ресурс металлических дымовых труб с учетом температурного и коррозионного воздействия. Науковий вісник будівництва. 2017. № 2 (88). С. 110–114.

7. *Долинский А. А., Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А.* Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника. 2014. № 4. С.27–36.

8. *Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А., Шевчук С. И., Дашковская И. Л.* Осушение дымовых газов котельных установок в конденсационных теплоутилизаторах. Международный научный журнал "Интернаука". 2019. № 15. С. 109–111. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15

9. *Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Пресіч Г.О., Гнєдаш Г.О.* Запобігання конденсатоутворенню в димових трубах котельних установок з системами теплоутилізації. Енергетика і автоматика №4. 2021. С.5-17. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.04.005

10. *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.

11. *Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Степанова А. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А.* Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монографія.: Київ: «Про формат». 2018. 248 с. ISBN 978- 966-02-8640-5.

12. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I.* Improvement of environmental conditions by applying heat-recovery technologies of boiler plants. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. 2021. №6. P.148-152. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148

13. *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

14. *Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Жученко І.М., Шевчук С. І., Гнєдаш Г.О.* Проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних трактів установок спалювання твердих побутових відходів та шляхи їх вирішення. Теплофізика та теплоенергетика. 2025. т. 47, №1. С. 7–18. https:doi.org//10.31472/ttpe.1.2025.1

15. *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. 2020. V.16. no.3. P.47-53. https://doi.org/10.15407/scin16.03.047

ENSURING RELIABLE OF CHIMNEYS WASTE INCINERATORS WITH EXHAUST HEAT RECOVERY SYSTEMS

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

[1]Corresponding 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
[2]PhD (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
[3]postgraduate student, Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021, orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@gmail.com
[4]PhD (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
[5]PhD (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.3.2025.6

The work is devoted to research on the development and scientific and technical substantiation of measures to ensure anticorrosion protection of solid waste incineration plants chimneys. The reliability, strength, and durability of these chimneys are essential for the uninterrupted operation of the main equipment of these plants. One of the reasons for the chimneys destruction is a deviation from the design mode of their operation, in particular due to condensation on the internal surfaces of these gas exhaust channels. Among the factors that exacerbate non-compliance with the design conditions of chimneys operation is the use of modern heat recovery technologies that lead to a significant decrease in exhaust gas temperature and a decrease in their velocity in the chimneys. The purpose of the work is to develop and investigate the effectiveness of measures to prevent condensation in the chimneys of a waste incineration heating boiler under conditions of using the deep cooling exhaust gas technology. The main objectives of the work were to determine the efficiency indicators of preventing condensation in the chimney when using the method of reducing heat losses from the chimney hull under conditions of its modification by heat insulation or placement of an insertion gas exhaust pipe; to establish the regularity of changes in the main thermal and humidity indicators at the chimney mouth with the specified modifications when using the air method of preventing condensation in gas exhaust ducts. Known thermal calculation methods of heat installations and the results of our own research into heat exchange during deep cooling of exhaust gases of boiler plants were used. The results of research of the main indicators of the thermal and humidity state (dew point tdp and internal surface temperature ts at the chimney mouth) under the conditions of using combined heat recovery systems and using the method of reducing heat losses from the chimney hull through the specified modifications are presented. It is shown that this method does not prevent the condensate formation at the mouth of the reinforced concrete chimney in all operating modes of the considered boiler during the heating period. Condensation prevention is only realized at negative ambient temperatures corresponding to high boiler heat loads. The regularities of changes in the studied indicators in the case of the combined use of two thermal methods, namely: a) the air method, which consists in mixing a part σ of the air heated in the heat recovery system with the exhaust gases cooled in the heat recovery system; b) the method of reducing heat losses to the environment (by heat insulation of the chimney hull or installing an insertion gas exhaust pipe in it). Based on the analysis results of the studied indicators, it is shown that using these two methods ensures the safe operation of the considered chimney in all boiler modes. At the same time, the part of mixed air σ does not exceed 5 %, and the heat consumption coefficient γ for the implementation of the methods is no higher than 5 % of the volume recovered heat.

References 15, figures 7.

Key words: chimneys, thermal methods, condensation prevention, corrosion protection efficiency.

1. *Burada C. O.* Degradation at the industrial dispersion and waste gas chimneys. Case study. Metalurgia International, 2011. no 16(1), P. 92.

2. *Korsun V. I.* O preduprezhdenii avariynykh situatsiy na promyshlennykh dymovykh i ventiliatsionnykh trubakh [On prevention of emergencies on industrial chimneys and ventilation pipes]. Budivelni konstruktsii [Building structures]. 2014. № 81. P. 244–253. (in rus.)

3. *Yavorska O. I*. Metodyka otsinky zalyshkovoho resursu tseglianykh dymovykh trub z urakhuvanniam faktychnoho stanu [Methodology for estimating the residual service life of brick chimneys taking into account the actual technical condition]. Problemy rozvytku miskoho seredovyshcha [Problems of urban development]. 2011. № 5 (6). P. 277–284. (in ukr.)

4. *Yaroviy S. M.* Typolohiia defektiv ta poshkodzhen metalevykh dymovykh ventiliatsiynykh trub, statystychnyy analiz poshkodzhuvanosti [Typology of defects and damages of metal chimneys and ventilation pipes, statistical analysis of damageability]. Naukovyy visnyk budivnytstva [Scientific bulletin of construction]. 2020. № 99.1. P. 213–221. (in ukr.) https://doi.org/10.29295/2311–7257–2020–99–1–222–227

5. *Korsun V. I., Hubanov V. V.* O sostoianii na promyshlennykh dymovykh i ventiliatsionnykh trub v Ukraine I merakh po obespecheniiu ikh ekspluatatsionnoy nadezhnosti [On the state of industrial chimneys and ventilation pipes in Ukraine and measures to ensure their operational reliability]. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури [bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2003. № 2. P. 19–22. (in rus.)

6. *Yarovyy S. M.* Dolgovechnost I ostatochnyy resurs metallicheskikh dymovykh trub s uchetom temperaturnogo i korrozionnogo vozdeystviia [Durability and residual life of metal chimneys taking into account temperature and corrosion effects]. Naukovyy visnyk budivnytstva [Scientific bulletin of construction]. 2017. № 2 (88). С. 110–114. (in rus.)

7. *Dolinsky A.A., Fialko N.M., Navrodskaia R.A., Gnedash G. A.* Osnovnye printsipy sozdaniia teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlia kotelnykh maloy teploenergetiki [Basic principles of heat recovery technologies for boiler of the low thermal power]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial heat engineering]. 2014. № 4. P.27–36. (in rus.)

8. *Fialko N. M., Navrodskaia R. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Dashkovskaia I. L.* Osusheniie dymovykh gazov kotelnykh ustanovok v kondensatsionnykh teploutilizatorakh [Drying exhaust-gases of boiler plants in condensation heat-recovery exchangers]. International Scientific Journal "Internauka". 2019. № 15. P. 109–111. (in rus.) https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15

9. *Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Presich G., Gnedash G.* Zapobihannia kondensatoutvorenniu v dymovykh trubakh kotelnykh ustanovok z systemamy teploutylizatsii [Prevention of condensation in chimneys of boiler plants with heat-recovery systems]. Enerhetyka i avtomatyka [Energy and Automation]. 2021. №4. P. 5–17. (in ukr.) http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.04.005

10. *Voicehivsky 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 s konstruktsii v budivnytstvi [Modern Technology Materials and Design in Construction]. 2017. № 2. P. 13–18. (in ukr.)

11. *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.)

12. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I.* Improvement of environmental conditions by applying heat-recovery technologies of boiler plants. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. 2021. №6. P.148-152. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148

13. *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

14. *Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S., Gnedash G.* Problemy ekspluatatsiynoy nadiynosti hazovidvidnykh traktiv ustanovok spaliuvannia tverdykh pobutovykh vidkhodiv ta shliakhy yikh vyrishennia [Problems of gas exhaust ducts operational reliability of municipal solid waste incineration plants and ways to solve them]. Teplofizyka ta teploenerhetyka [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2025. V. 47, №1. P. 7–18. (in ukr.) https:doi.org//10.31472/ttpe.1.2025.1

15. *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. 2020. V.16. no.3. P.47-53. https://doi.org/10.15407/scin16.03.047

Отримано 30.06.2025
Received 30.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК: 621.036; 697.4

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ

Петраш В.Д.[1], Баришев В.П., Шевченко Л.Ф., к.т.н., **Голубенко А.В.**
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

[1]д.т.н., професор, petrash6@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0413-233X
[2]к.т.н., доцент, baryshev@odaba.edu.ua, 0009-0007-9086-3211
[3]доцент, bgedyx7@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3296-3007
[4]аспірант, andrey.ovk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3891-7813

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.7

Дослідження присвячене розв'язанню актуальної задачі підвищення енергетичної ефективності комбінованого теплопостачання в умовах зростання парокомпресійної генерації теплоти на основі енергії доохолодження відпрацьованого енергоносія з теплової мережі, початкової холодної води та відхідних газів. Науковим результатом дослідження стали встановлені залежності дійсного коефіцієнта перетворення та відношення генерованої теплоти в підсистемі з ТНУ до загальної потужності генерованої теплоти для теплопостачання від режимних параметрів і температурних умов структурних підсистем за тривалістю опалювального періоду. Результати дослідження запропонованої системи доповнюють основу її інженерного розроблення з урахуванням характерних умов функціонування.

The research is devoted to solving the urgent problem of increasing energy efficiency of combined heat supply with increasing vapour-compression heat generation on the basis of aftercooling energy of the waste energy carrier from the heating network, initial cold water and flue gases. The scientific result of the study is the generalised dependences of the actual conversion coefficient and the ratio of the generated heat in the subsystem with HPU to the total heat generation for heat supply on the regime parameters and temperature conditions of the structural subsystems for the duration of the heating period. The results of research of the proposed system create a basis for its engineering development taking into account the characteristic conditions of combined heat supply.

Бібл. 15, рис. 3.
Ключові слова: теплопостачання, двоступенева генерація теплоти, коефіцієнт перетворення.

Вступ

Постановка задачі. Розв'язання актуальної задачі загальної проблеми енергозбереження спрямоване на підвищення ефективності запропонованої системи комплексного теплопостачання цивільних будівель і промислових підприємств. Необхідність подальшого дослідження для практичного застосування зазначених систем зумовлена їх розвитком і модернізацією на основі підвищених енергетичних та екологічних можливостей теплонасосних технологій для умов варіативного поєднання характерних низькотемпературних джерел. Актуальним також є пошук оцінки загального впливу вихідних параметрів і режимних умов роботи структурних підсистем для підвищення енергетичної ефективності при збільшенні теплової потужності ТНУ за двоступеневою схемою генерації теплоти з наявністю характерних низькотемпературних джерел. Більшість комплексних систем теплопостачання варіативно мають у своєму розпорядженні значний енергетичний ресурс для використання теплоти низькотемпературних джерел (банно-пральних комбінатів, плавальних басейнів, підприємств громадського харчування) та промислового призначення (виготовлення бетонних розчинів і будівельних конструкцій, багатопрофільних переробних підприємств харчової промисловості), температура яких перебуває в широких межах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками аналітичні дослідження щодо практичного використання побутових і промислово-технологічних теплових відходів, як низькотемпературних джерел теплоти в роботі традиційних і високотемпературних теплових насосів, стають дедалі актуальнішими. Для аналізу можливостей більш повного застосування теплових насосів у централізованому теплопостачанні авторами [1, 2] досліджувалися теплотехнічні параметри відповідних систем, а саме температури теплоносія в розподільчих і зворотних магістралях, які мають тенденцію зниження. Подача теплоти технологічним споживачам з температурою вище 120 °С може бути здійснена з використанням високотемпературних теплових насосів [1], а теплоносій у розподільчому та зворотному трубопроводах можуть

використовуватися як низькотемпературні джерела теплоти. Авторами [1, 3, 4] проаналізовано три варіанти схем теплових насосів та сім видів робочих тіл для теплопостачання з температурою подачі 140 °С, в яких теплоносій у розподільчій і зворотній магістралях розглядався як низькотемпературні джерела теплоти.

Авторами [5] на основі результатів енергетичного та екологічного моделювання обґрунтовано можливість інтеграції теплових насосів у системах опалення будівель та централізованого теплопостачання із загальною оцінкою їхньої ефективності. Зазначається, що централізоване теплопостачання є більш перспективним як у новобудовах міських районів, так і в існуючих будівлях. Аналогічно авторами [6, 7] проаналізовано умови та переваги теплових насосів на основі результатів моделювання. Обґрунтовано, що теплові насоси мають вищий енергетичний та економічний потенціал використання їх у системах централізованого теплопостачання порівняно з існуючим його рівнем.

Досліджено умови високоефективного використання ТНУ [8] для глибокого охолодження газів, які відходять, при комбінованій роботі з водогрійним котлом. Зазначається, що максимум енергетичної ефективності котла з тепловим насосом досягається за цілком певної оптимальної температури доохолодження відхідних газів після теплогенератора.

Авторами [9] досліджено запропоновану систему централізованого теплопостачання з розширеними можливостями застосування теплових насосів, яка дає змогу збільшити пропускну спроможність теплових мереж із переходом на низькотемпературний графік відпуску теплоти. Вона знижує теплові втрати в магістралях, збільшуючи їхній ресурс і надійність роботи за умови зменшення аварійності та зниження викидів відхідних газів. У роботі [10] визначено умови і межі зміни основних характеристик ТНУ з електро- і газотурбінним приводом компресора з урахуванням співвідношення цін на енергоносії, за яких досягається підвищення ефективності ТНУ та економія палива понад 20%.

Запропоновано [11] схему теплопостачання, у якій як пікове джерело теплоти використовують тепловий насос, конденсатори якого встановлені на кожному розподільчому трубопроводі, а на зворотних трубопроводах - випарники. Таке рішення дає змогу підвищити ефективність систем централізованого теплопостачання з виключенням коригування температури теплоносія в розподільних трубопроводах теплової мережі.

Авторами [12] для розробленої системи комплексного теплопостачання встановлено модифіковану залежність дійсного коефіцієнта перетворення енергетичних потоків з використанням ТНУ на основі енергії доохолодження відпрацьованого теплоносія з теплової мережі, вихідної холодної води та газів, які відходять. Для запропонованої системи теплопостачання авторами [13] виконано аналітичне обґрунтування можливостей збільшення загальної потужності генерованої теплоти з аналізом умов підвищення її ефективності. Результати аналітичного дослідження запропонованої системи створюють основу для її інженерної розробки.

У роботі [14] обґрунтовано, що зниження температури відпрацьованого теплоносія призводить до підвищення ефективності використання палива в котлах, зниження споживання електроенергії в роботі циркуляційних насосів та втрат теплоти в магістральних трубопроводах. Зазначається, що отримання економічного ефекту вимагає як нових технічних рішень, так і наукового обґрунтування з економічним аналізом особливостей джерела теплоти, характеристик палива та умов підвищення використання споживаної теплоти.

Розробкою [15] запропоновано інтегрований устрій комбінованих систем централізованого теплопостачання на основі ТЕЦ для віддалених споживачів із застосуванням можливостей теплонасосних технологій у системах гарячого водопостачання, які забезпечуються на основі енергетичного потенціалу відпрацьованого теплоносія з ТЕЦ.

Таким чином, з аналізу результатів останніх досліджень випливає, що спільне використання наявного потенціалу теплоти низькотемпературних джерел, які варіативно поєднуються на основі термотрансформаторних технологій, дає змогу забезпечити подальший розвиток сучасного теплопостачання для підвищення ефективності систем зі зниженням витрат палива, яке використовується, та шкідливого екологічного впливу газів, які надходять до навколишнє середовище. Загальна ефективність систем генерації, розподілу і споживання теплоти на основі парокомпресійної трансформації енергетичних потоків залежить як від структурно-функціонального устрою комбінованої системи, так і від мінливих режимів роботи підсистем комунально-побутового і промислово-технологічного призначення в різні періоди року. Отже, подальше дослідження процесів комбінованого використання енергії доохолодження відпрацьованого теплоносія з теплової мережі, вихідної холодної води та газів, які відходять, дасть змогу розширити загальний обсяг генерованої теплоти з підвищенням енергоекологічної ефективності використання первинної енергії на основі теплонасосних технологій, що зумовлює необхідність розв'язання відповідних завдань у розв'язанні загальної проблеми енергозбереження.

Матеріали та методи досліджень. Метою роботи стало розв'язання задач стосовно подальшого розвитку запропонованого комплексного теплопостачання в умовах зростання парокомпресійної генерації теплоти на основі інтегрованого низькотемпературного енергетичного потенціалу відпрацьованого теплоносія з теплової мережі, вихідної холодної води загального призначення та відхідних газів. Для їх вирішення передбачається аналітичний аналіз умов підвищення енергетичної ефективності використання інтегрованого потенціалу джерел за умов збільшення парокомпресійної генерації теплоти для характерних режимів функціонування відповідних підсистем у різні періоди року. Розв'язання відповідних завдань передбачається на основі аналітичного обґрунтування структурно-функціонального устрою з пошуком шляхів забезпечення енергоефективної роботи запропонованої системи теплопостачання для характерних режимів і температурних умов її функціонування.

Методика проведення дослідження базується на подальшому розвитку структурно-функціонального устрою запропонованої системи з її теоретичним дослідженням для вирішення сформульованих завдань.

На рис. 1 представлено схему загального устрою системи, яка забезпечує спільне доохолодження відпрацьованого теплоносія з теплової мережі (ВТТМ), початкової холодної води загального призначення та відхідних газів на основі використання енергоефективної трансформації інтегрованої теплоти для абонентських систем комунально-побутового та промислово-технологічного призначення. Устрій та робота запропонованої системи викладено в [12, 13]. Нижче наведено короткий опис її функціонування.

Відпрацьований теплоносій по трубопроводу 1 надходить у теплообмінник 2 для попереднього його охолодження в процесі експлуатаційного регулювання системи теплопостачання. Після випарника 3 частина ВТТМ за допомогою триходового температурного регулятора 4 по відгалуженій ділянці 5 за допомогою циркуляційного насоса 6 надходить до рекуперативного теплообмінника 10 і частково до рециркуляційного трубопроводу 8. В подальшому рециркуляційна частина ВТТМ надходить по трубопроводу 9 в трубопровід 1 теплової мережі. ВТТМ після доохолодження в рекуперативному теплообміннику 2 з рециркуляційною його частиною надходить послідовно у випарник 3 і конденсатор 19 теплового насоса. Потім за допомогою триходового температурного регулятора ВТТМ змішується з байпасною його частиною, яка надходить по трубопроводу 24 з відповідною температурою і спільним потоком прямує в теплогенератор 15. Зазначеним рішенням забезпечується енергоефективний процес спільної генерації теплоти в ТНУ і теплогенераторі 15 із загальним розподілом і споживанням її абонентськими системами. Пари робочого тіла теплонасосного контуру після випарника 3 і догрівання в рекуперативному теплообміннику 16 стискаються компресором 17 з тепловим еквівалентом приводної потужності W. Стиснуті пари робочого тіла за допомогою запірних клапанів 18 з розподільним трубопроводом надходять паралельно в першу 20 та другу 19 частини конденсатора. Конденсат робочого тіла після кожної з них проходить послідовно через рекуперативний теплообмінник 16 і дросельний вентиль 21. В подальшому робоче тіло надходить у випарник 3 для наступного циклу. Таким рішенням забезпечується стабілізація необхідного зниження температури охолодження ВТТМ, який надходить до циркуляційного насоса 22 на вході в теплогенератор 15. Це забезпечує підтримання раціонального температурного режиму спільного відбору теплоти доохолодження вихідної холодної води з трубопроводу 11, ВТТМ з теплової мережі 1, а також з відпрацьованих газів у теплообміннику 14. Вихідна холодна вода для комунально-побутового та технологічного призначення з трубопроводу після доохолодження в рекуперативному теплообміннику 10 надходить до теплообмінника 2, а потім трубопроводом 27 до конденсатора 20. В подальшому вона за допомогою триходового температурного регулятора за відповідної температури спрямовується в баки-акумулятори 29 і 30 для гарячого водопостачання з дворівневою температурою. Частина доохолодженої початкової холодної води загального призначення з трубопроводу 11 зі зниженою температурою після рекуперативного теплообмінника 10 за допомогою триходового температурного регулятора 12 відгалуженим трубопроводом 13 надходить у теплообмінник 14 для доохолодження відпрацьованих газів після теплогенератора 15. Зазначена частина нагрітої води, в залежності від співвідношення температур та витрат відпрацьованих газів і води, нагрівається до відповідної температури, після чого вона надходить по трубопроводу 32 до розподільчого температурного регулятора 31 з датчиком різниці температур з відгалуженими ділянками. Через відгалуження вода надходить у баки-акумулятори 29 і 30. Трубопроводом 33 з відповідною температурою і витратою вона надходить у системи теплотехнологічного призначення. Закономірно, що її температура і витрата визначається технологічними умовами та тепловими балансами в теплообмінниках 2 і 10 з відповідними температурами, забезпечуючи ефективну роботу

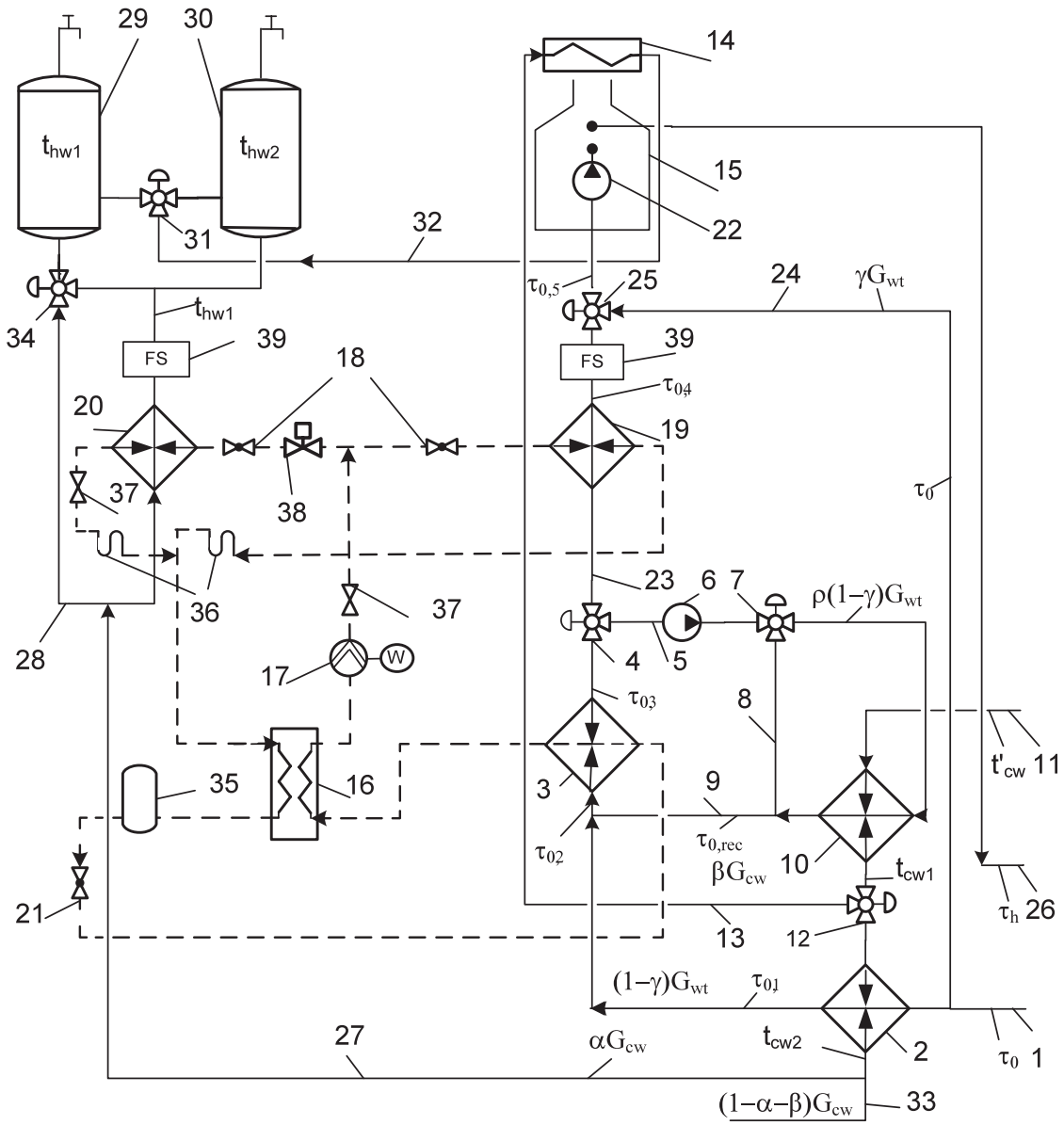


Рисунок 1: Принципова схема системи комбінованого теплопостачання з двоступеневою генерацією теплоти на основі інтегрованої енергії доохолодження відпрацьованого теплоносія, початкової холодної води та відпрацьованих газів. 1 – зворотний трубопровід теплової мережі; 2 – рекуперативний теплообмінник; 3 – випарник теплового насоса; 4 – триходовий температурний регулятор; 5 – рециркуляційний трубопровід; 6 – циркуляційний насос; 7 – триходовий температурний регулятор; 8 – відгалужена ділянка рециркуляційного трубопроводу; 9 – загальний рециркуляційний трубопровід; 10 – теплообмінник; 11 – трубопровід початкової холодної води; 12 – триходовий температурний регулятор; 13 – трубопровід до теплообмінника доохолодження відпрацьованих газів; 14 – теплообмінник відбору теплоти відпрацьованих газів; 15 – теплогенератор; 16 – рекуперативний теплообмінник теплового насоса; 17 – компресор теплового насоса із зовнішнім приводом; 18 – запірний клапан; 20, 19 – паралельно з'єднані перша і друга частини конденсатора; 21 – дросель-вентиль; 22 – циркуляційний насос;

23 – трубопровід відпрацьованого теплоносія з мережі; 24 – байпасний трубопровід; 25 – триходовий температурний регулятор; 26 – магістральний трубопровід теплової мережі; 27, 28 – розподільні трубопроводи для дворівневого гарячого водопостачання; 29, 30 – баки-акумулятори для дворівневого гарячого водопостачання; 31 – двоходовий температурний регулятор з датчиком різниці температур для розподілу гарячої води; 32, 33 – трубопроводи для гарячого водопостачання і теплотехнологічного призначення; 34 – триходовий температурний регулятор; 35 – ресивер; 36 – гідравлічний затвор; 37 – зворотний клапан; 38 – соленоїдний клапан; 39 – реле протоку; 40 – живильний насос

Figure 1. Schematic diagram of the design of a thermotransformer system of decentralized heat supply based on the integrated energy of post-cooling used heat carrier from the network, initial cold water and exhaust gases. 1 – return pipeline of the heating network; 2 – recuperative heat exchanger; 3 – heat pump evaporator; 4 – three-way temperature regulator; 5 – recirculation pipeline; 6 – circulation pump; 7 – three-way temperature regulator; 8 – branch section of the recirculation pipeline; 9 – common recirculation pipeline; 10 – heat exchanger; 11 – initial cold water pipeline; 12 – three-way temperature regulator; 13 – pipeline to the heat exchanger for post-cooling of exhaust gases; 14 – heat exchanger for extracting heat from exhaust gases; 15 – heat generator; 16 – regenerative heat exchanger of the heat pump; 17 – heat pump compressor with external drive; 18 – shut-off and regulating valve; 20, 19 – first and second parts of the capacitor connected in parallel; 21 – throttle valve; 22 – circulation pump; 23 – waste coolant pipeline from the network 24 – bypass pipeline; 25 – three-way temperature regulator; 26 – main pipeline of the heating network; 27, 28 – distribution pipelines for two-level hot water supply; 29, 30 – storage tanks for two-level hot water supply; 31 – two-way temperature regulator with temperature difference sensor for hot water distribution; 32, 33 – pipelines for hot water supply and heat technology purposes; 34 – three-way temperature regulator; 35 - receiver; 36 - hydraulic shutter; 37 - check valve; 38 - solenoid valve; 39 - flow switch; 40 - feed pump

ТНУ. При цьому окрім основного призначення, розширюються можливості її додаткового використання і як низькопотенційного джерела з підвищеною температурою вихідної холодної води, яка надходить в подальшому для відповідного технологічного застосування. Отже, вихідна холодна вода загального призначення послідовно використовується для попереднього охолодження ВТТМ теплоносія та доохолодження відпрацьованих газів для подальшого використання її в СГВ з можливістю паралельного нагрівання другої частини в конденсаторі 20 для підвищення енергетичної ефективності роботи парокомпресійного теплового насоса.

Позитивною особливістю в роботі системи є також можливість збільшення складової парокомпресійного теплового потоку під час нагрівання води для СГВ як у перехідний, так і в міжопалювальний період з можливістю роботи ТНУ в моноенергетичному режимі.

Аналітичне дослідження енергетичної ефективності комбінованого теплопостачання при підвищенні парокомпресійної генерації теплоти. Енергетична ефективність парокомпресійних ТНУ визначається дійсним коефіцієнтом перетворення у вигляді співвідношення енергетичних потоків згідно [8] із залежністю:

$$\varphi = \frac{Q_c}{W_c}, \qquad (1)$$

де Q_c – теплова потужність конденсаторів 19 і 20 із загальним тепловим потоком $Q_{c1} + Q_{c2}$;

W_c – тепловий еквівалент зовнішньої приводної потужності в роботі компресора теплового насоса, яку можна подати у вигляді $W_c = Q_{c1} + Q_{c2} - Q_v$

Рівняння теплової потужності відповідних конденсаторів 19, Q_{c1}, 20, Q_{c2} випарника Q_v, з урахуванням режимних параметрів α, γ, β, $\frac{G'_{cw}}{G'_{wt}}$ і відповідних

температур [12, 13], записуються у вигляді:

$$Q_{\text{c1}} = c_{\text{P}}\alpha G'_{\text{cw}}\left(t_{\text{hw}} - t_{\text{cw}} - \frac{1}{\bar{G}}\frac{(1-\gamma)}{(1-\beta)}\left(\tau_o - \tau_{o,1}\right)\right); \quad (2)$$

$$Q_{\text{c2}} = c_p(1-\gamma)G'_{wt}\left(\tau_{o,4} - \tau_{o,3}\right); \quad (3)$$

$$Q_{\text{v}} = c_p(1+\rho)(1-\gamma)G'_{wt}\left(\tau_{o,2} - \tau_{o,3}\right). \quad (4)$$

Стабілізація температури відпрацьованого теплоносія $\tau_{0,2}$ на вході в випарник 3 і температури холодної води t_{cw2} на вході в конденсатор 20 має суттєве значення для забезпечення енергоефективного процесу в двоступеневій схемі генерації теплоти за тривалістю опалювального періоду. Відомо, що згідно з теплотехнологічними вимогами до теплонасосних установок, температура ВТТМ $\tau_{0,2}$ на вході в випарник обмежується 20 ÷ 25 °С. Виконання цієї вимоги може бути забезпечено при рециркуляції ВТТМ трубопроводами 8, 9, тобто за бездіяльності теплообмінника 10.

Проаналізуємо енергетичну ефективність роботи системи в цьому режимі. Зазначимо суттєве функціональне значення теплообмінника 2 в забезпеченні зазначених вимог. Для прийнятих температур (вихідної холодної води і ВТТМ після теплообмінника 2, відповідно t_{cw2} і $\tau_{0,1}$ з урахуванням обґрунтованих значень режимних параметрів β, γ за змінних значень t'_{cw} і τ_0), співвідношення витрат вихідної холодної води G'_{cw} і ВТТМ із теплової мережі G'_{wt} ($\bar{G} = G'_{cw}/G'_{wt}$) однозначно визначаються взаємозв'язком їхніх температурних і режимних умов у вигляді [12, 13]:

$$\bar{G} = \frac{(1-\gamma)(\tau_0 - \tau_{0,1})}{(1-\beta)(t_{cw2} - t'_{cw})}. \quad (5)$$

Логічно проаналізувати ефективність перетворення енергетичних потоків у процесі двоступеневої генерації теплоти для умов рециркуляції ВТТМ за бездіяльності теплообмінника 10. Закономірно, що в цьому режимі роботи системи температура холодної води на вході в теплообмінник 2 дорівнює відповідному її значенню на вході в систему, тобто $t_{cw1} = t'_{cw}$. При цьому температура ВТТМ у трубопроводі 9 контуру рециркуляції $\tau_{0,rec}$, дорівнює його температурі після випарника $\tau_{0,3}$. В результаті залежність коефіцієнта рециркуляції ρ теплоносія по трубопроводах 8 і 9, після випарника 3 згідно з [12, 13] визначається у вигляді:

$$\rho = \frac{(\tau_{0,1} - \tau_{0,2})}{(\tau_{0,2} - \tau_{0,rec})}. \quad (6)$$

Для аналізованого варіанта двоступеневої генерації теплоти з рециркуляцією ВТТМ та бездіяльності теплообмінника 10 коефіцієнт ρ, згідно із залежністю (6), однозначно визначається відповідними температурами $\tau_{0,rec}$, $\tau_{0,1}$ і $\tau_{0,2}$. Водночас значення температур t_{cw2}, $\tau_{0,1}$ і режимних параметрів β і γ за відповідних температур t'_{cw} і τ_0, згідно з рівнянням 5, однозначно визначають співвідношення водних потоків $\bar{G}$.

Для розглянутих умов роботи системи з двоступеневою генерацією теплоти залежність дійсного коефіцієнта перетворення φ на основі [12, 13] набуває вигляду:

$$\varphi = \left[1 - \frac{(1-\gamma)(1+\rho)(\tau_{0,2} - \tau_{0,3})}{\alpha\bar{G}(t_{\text{hw}} - t_{cw2}) + (1-\gamma)(\tau_{0,4} - \tau_{0,3})}\right]^{-1}, \quad (7)$$

де t_{cw2} – температура холодної води після теплообмінника 2, яка визначається як:

$$t_{cw2} = t'_{cw} + \frac{1}{\bar{G}}\frac{(1-\gamma)}{(1-\beta)}\left(\tau_0 - \tau_{0,1}\right). \quad (8)$$

Ефективність роботи системи з двоступеневою генерацією теплоти для комунально-побутового та промислово-технологічного призначення аналізувалася на основі (7) в залежності від змінних параметрів і режимних умов її роботи. Температура t'_{cw} початкової холодної води визначалася з урахуванням зміни температури зовнішнього повітря в опалювальний період року, а температура ВТТМ τ_0 – відповідно до графіка експлуатаційного регулювання системи опалення з розрахунковими значеннями (95 - 70) ºС. В якості режимних умов розглядалися обґрунтовані значення відповідних параметрів в діапазонах:

$\bar{G}$=0.1÷1.5 та α = 0.1 ÷ 0.15, при β = 0.05 та γ = 0.1.

На рис. 2 ілюструється графічна залежність дійсного коефіцієнта перетворення φ від зміни температури зовнішнього повітря t'_a по тривалості опалювального періоду для схеми з рециркуляцією ВТТМ в разі бездіяльності теплообмінника 10 з наступними початковими та режимними параметрами:

t_{cw2} = 35 °С, $\tau_{0,2}$ = 23 °С, $\tau_{0,4}$ = 35°С і 45 °С з β = 0,1 і γ = 0,1.

З рис. 2 випливає, що значення дійсного коефіцієнта перетворення φ істотно зростає з 2,8 до 5,4 за умов зміни температури довкілля t'_a по тривалості опалювального періоду до його закінчення при $\tau_{0,4}$ = 35 °С, і менш суттєво – з 2,1 до 2,6 при $\tau_{0,4}$ = 45 °С.

Становить інтерес також аналіз спільного впливу теплоенергетичних параметрів та режимних умов в

роботі комбінованого теплопостачання на збільшення генерованої потужності в підсистемі з ТНУ в опалювальний період у разі рециркуляції ВТТМ після випарника трубопроводами 8, 9 в умовах бездіяльності теплообмінника 10.

Приводна потужність W компресора ТНУ, яка визначається на основі залежності дійсного коефіцієнта перетворення φ в роботі ТНУ при загальній потужності конденсаторів $Q_{hpu}=Q_{c1}+Q_{c2}$, має вигляд:

$$W = \frac{Q_{hpu}}{\varphi} = \frac{Q_{c1}+Q_{c2}}{\varphi}, \quad (9)$$

де тепловий потік Q_{hpu}, який генерується в ТНУ, визначається співвідношенням:

$$Q_{hpu} = \varphi \frac{W}{\eta_{cm}} = \frac{Q_{c1}+Q_{c2}}{\eta_{cm}}; \quad (10)$$

де η_{cm} – коефіцієнт корисної дії компресора ТНУ.

Загальний тепловий потік, який генерується в комбінованій системі теплопостачання з двоступеневою генерацією теплоти Q_c, визначається залежністю:

$$Q_c = Q_{chgu} + Q_{hw,eg} + Q_{hpu} + Q_{tech}, \quad (11)$$

Рівняння для відповідних теплових потоків комбінованого теплопостачання із загальною потужністю Q_c, згідно із залежністю (11), подаються такими рівняннями:

Q_{chgu} – генерований тепловий потік в підсистемі з ТГУ після другого конденсатора, що враховує байпасну частину γ ВТТМ, визначається як:

$$Q_{chgu} = c_p(1-\gamma)G'_{wt}(\tau_h - \tau_{0,4}) + c_p\gamma G'_{wt}(\tau_h - \tau_0); \quad (12)$$

$Q_{hw,eg}$ – генерований тепловий потік в підсистемі доохолодження відхідних газів визначається у вигляді:

$$Q_{hw,eg} = c_p\beta G'_{cw}(t_{hw,eg} - t_{cw1}); \quad (13)$$

Q_{hpu} – генерований тепловий потік в підсистемі з ТНУ з відповідними витратами $\alpha G'_{wt}$ для гарячого водопостачання та теплопостачання $(1-\gamma)G'_{wt}$, визначається як:

$$Q_{hpu} = c_p\alpha G'_{wt}(t_{hw} - t_{cw2}) + c_p(1-\gamma)G'_{wt}(\tau_{0,4} - \tau_{0,3}); \quad (14)$$

Q_{tech} – тепловий потік для побутового та промислово-технологічного призначення з відповідною витратою $(1-\alpha-\beta)\ G'_{cw}$, визначається згідно залежності:

$$Q_{tech} = c_p(1-\alpha-\beta)G'_{cw}(t_{cw2} - t_{cw1}). \quad (15)$$

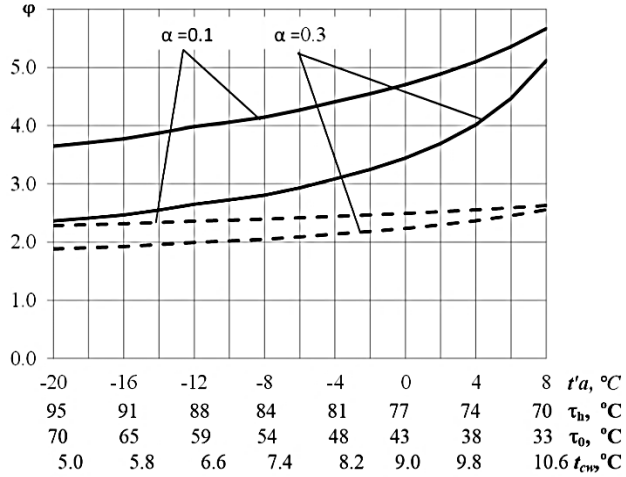


Рисунок 2. Залежність дійсного коефіцієнта перетворення φ з рециркуляцією відпрацьованого теплоносія в умовах бездіяльності теплообмінника 10 при зміні температури навколишнього середовища —— – $\tau_{0,4}$ = 35 °C, - - - – $\tau_{0,4}$ = 45 °C.

Figure 2. Dependence of the actual conversion efficiency φ with recirculation of the waste heat carrier and inactivity of the heat exchanger 10 when the ambient temperature changes t'_a..
—— – at $\tau_{0,4}$ = 35 °C,- - - – at $\tau_{0,4}$ = 45 °C

Таким чином, відношення генерованої потужності в підсистемі з ТНУ до загальної потужності запропонованої системи теплопостачання $\bar{Q}_{hpu} = \frac{Q'_{\text{hpu}}}{Q'_c}$, представляється у вигляді:

$$\bar{Q}_{hpu} = \frac{\alpha\frac{G'_{cw}}{G'_{wt}}(t_{hw}-t_{cw2})+(1-\gamma)(\tau_{o,4}-\tau_{o,3})}{\tau'_r-\tau_{o,3}-\gamma(\tau'_0-\tau_{o,3})+\frac{G'_{cw}}{G'_{wt}}\left(\beta\,(t_{hw,eg}-t_{cw1})+(t_{hw}-t_{cw2})+(1-\alpha-\beta)(t_{cw2}-t_{\,cw1})\right)}\ . \qquad (16)$$

На рис. 3. ілюструється залежність зміни відношення генерованої потужності в підсистемі з ТНУ до її загальної потужності для теплопостачання згідно з $\bar{Q}_{hpu}$ (16) від температури зовнішнього повітряи t'_a по тривалості опалювального періоду, при значенні проміжної температури відпрацьованого теплоносія після конденсатора 19 на вході ТГУ $\tau_{0,4}$=35 °С і 45 °С. При цьому співвідношення водних потоків розглядалося в діапазоні $\frac{G'_{cw}}{G'_{wt}} = 0.13 \div 1.60$, а дійсного коефіцієнта перетворення – φ = 1.9 ÷ 5.7 при режимних параметрах α = 0.1 і 0.3 з β = 0.1 та γ = 0.1.

З аналізу графіків на рис. 3. випливає, що залежність відношення потужності, яка генерується в підсистемі з ТНУ до загальної потужності в запропонованій системі теплопостачання $\bar{Q}_{\text{hpu}}$, суттєво зростає від мінімальних значень при розрахунковій температурі зовнішнього повітря t'_a= -20 °С до максимальних при відповідній температурі зовнішнього повітря t'_a= 8.0 °С до кінця опалювального періоду, при всіх значеннях проміжної температури відпрацьованого теплоносія $\tau_{0,4}$ для зумовлених співвідношень водних потоків $\frac{G'_{cw}}{G'_{wt}} = 0.13 \div 1.60$ та відповідних значень дійсних коефіцієнтів перетворення φ = 1.9 ÷ 5.7 при α = 0.1, 0.3, β = 0.1 та γ = 0.1. Найбільші значення $\bar{Q}_{\text{hpu}}$ відзначаються при проміжній температурі відпрацьованого теплоносія після конденсатора 19 $\tau_{0,4}$ = 45 °С при витраті води на гаряче водопостачання з α = 0.3. В цих умовах відношення $\bar{Q}_{\text{hpu}}$ зростає від 0.39 при температурі зовнішнього повітря t'_a= -20 °С до 0.57 при t'_a= 8.0 °С. Водночас відношення $\bar{Q}_{\text{hpu}}$ при $\tau_{0,4}$ = 45 °С і α = 0.1 зростає від 0.32 при температурі зовнішнього повітря t'_a= -20 °С до 0.56 при t'_a= 8.0 °С до кінця опалювального періоду.

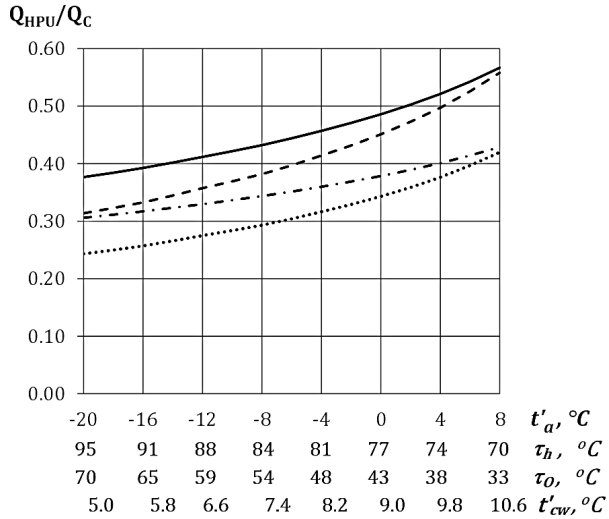


Рисунок 3. Залежність зростання генеруючої потужності в підсистемі з ТНУ $\bar{Q}_{hpu}$, при зміні температури навколишнього середовища t'_a. При α = 0.1, 0.3, β=0.1 і γ = 0.1 ——– $\tau_{0.4}$=45 °С, α = 0.3; — — – $\tau_{0.4}$=45 °С, α = 0.1; — · — – $\tau_{0.4}$=35 °С, α=0.3; …. – $\tau_{0.4}$=35 °С, α=0.1

Figure 3. Dependence of the increase of the generated power in the subsystem with HPU $\bar{Q}_{hpu}$, when the ambient temperature changes t'_a. At α = 0.1, 0.3, β=0.1 and γ = 0.1. ——– – at $\tau_{0.4}$=45 °С, α = 0.3; — — – at $\tau_{0.4}$=45 °С, α = 0.1; — · — – at $\tau_{0.4}$=35 °С, α=0.3; ···· – at $\tau_{0.4}$=35 °С, α=0.1

Висновки та перспективи подальшого дослідження

1. Для вдосконаленої системи комбінованого теплопостачання з двоступеневою генерацією теплоти отримано узагальнену залежність визначення дійсного коефіцієнта перетворення в роботі ТНУ на основі енергії доохолодження відпрацьованого теплоносія, початкової холодної води та відпрацьованих газів по тривалості опалювального періоду. На її основі встановлено, що на значення дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ досить суттєво впливає значення проміжної температури відпрацьованого теплоносія після конденсатора на вході в ТГУ.

2. Отримано узагальнену залежність для визначення відношення генерованої теплоти в підсистемі з ТНУ до загальної її генерації в системі теплопостачання від режимних параметрів роботи та температур в структурних підсистемах. Виявлено умови значного зростання генерованої теплоти в підсистемі з ТНУ відносно її загальної генерації в системі теплопостачання при зміні температури зовнішнього повітря по тривалості опалювального періоду та раціональних значень проміжної температури відпрацьованого теплоносія.

3. Встановлені залежності дають змогу проводити комплексну оцінку підвищення енергетичної ефективності системи та умов зростання генерованої потужності з урахуванням зміни температур характерних низькотемпературних джерел, співвідношення та розподілу водних потоків і холодної води для комунально-побутового та промислово-технологічного призначення.

4. Результати аналітичного дослідження умов зростання енергетичної ефективності та генерованої потужності в підсистемі з ТНУ для вдосконаленої системи комбінованого теплопостачання створюють підґрунтя для її інженерної розробки в енергоощадній технології теплопостачання будівель комунально-побутового та підприємств промислово-технологічного призначення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Haochen Wang, Nefodov D., Richter M., Urbaneck T.* Feasibility Study Concerning Process Heat Supply in District Heating System with Heat Pump. January 2024. Euroheat and Power (English Edition) Euroheat and Power (English Edition).

2. *Arpagaus C.* Hochtemperatur-Wärmepumpen Marktübersicht; Stand der Technik und Anwendungspotenziale. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 201C).

3. *Höges C., Roskosch D., Brach J., Vering C., Venzik V., Müller D.* Investigation of the föteractions between Refrigerant Energy Technol. Vol. 11 (2023).

4. *Nefodov D.; Xiao S.; Richter M.; Urbaneck T.* Nutzung eines Ferriwärme-Rücklaufs als Wärmequelle zur Versorgung eines Nahwärmenetzes mit Wärmepumpen - Teil 2. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik VDI Fachmedien 72. (2021) Vol. 6, pp. 59-63.

5. *Ochs F., Magni M., Dermentzis G.* Integration of Heat Pumps in Buildings and District Heating Systems–Evaluation on a Building and Energy System Level. Energies 15(11):3889 May 2022.

6. *Kontu K., Rinne S., Junnila S.* Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. Cite https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077.

7. *22/6. Heat Roadmap Europe*: Large - Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems / A. David [et al.] // Energies, 2017, Vol. 10, No 4. pp. 1–18. https://doi.org/10.3390/en10040578.

8. *Клименко В.Н.* Некоторые особенности внедрения парокомпрессионных тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов. Промышленная теплотехника, 2011, том 31, №. 5, сс. 42-48.

9. *Степанов О.А., Третьякова П.А*. Система централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов. Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2015, том. 1, no. 4, сс. 43-51.

10. *Чепурной М.Н., Ткаченко С. И., Резидент Н.В.* Особенности применения парокомпрессионных теплонасосных установок. Энергетика и электротехника. Научные труды ВНТУ, 2013, №. 2.

11. *Батухтин А.Г.* Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности сушествующих систем централизованного теплоснабжения. Научные и технические ведомости// СПб ГПУ, 2010, №. 2, сс. 28-33.

12. *Petrash V., Baryshev V., Shevchenko L., Geraskina E.* Efficiency of decentralized heat supply based on traditional heat generators with vapour-compression conversion of energy from low-temperature sources. Engineering for rural development. Jelgava, 22.-24.05.2024. pp. 1106–1113. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23. TF228.

13. *Petrash V.D., Baryshev V.P., Shevchenko L.F., Geraskina E.A., Golubenko A.V.* Effectiveness of decentralized heat supply based on traditional heat generators with vapor compression energy transformation of low-temperature sources. Modern construction and architecture, 2024, no. 8, pp. 80-89.

14. *Кисилев Н.Н., Леонова Ю.В.* Влияние температуры обратной воды на эффективность работы районных отопительных котельных. Новости теплоснабжения, 2017, № 9, (205).

15. *Андрющенко А. И.* и соавт. Система централизованного теплоснабжения, горячего и холодного водоснабжения. Пат. № 2306489 РФ, 2007.

ENERGY EFFICIENCY OF COMBINED HEAT AND POWER SUPPLY IN THE CONTEXT OF INCREASING STEAM COMPRESSION HEAT GENERATION

Petrash V.D.[1], Baryshev V.P.[2] Shevchenko L.G.[3], Golubenko A.V.[4]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor, petrash6@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0413-233X
[2]Ph.D., Associate Professor,baryshev@odaba.edu.ua, 0009-0007-9086-3211
[3]PhD, Associate Professor,bgedyx7@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3296-3007
[4]PhD student, andrey.ovk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3891-7813

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.7

Abstract. This study addresses the pressing issue of improving the energy efficiency of combined heat supply systems with two-stage heat generation and expanding vapour-compression heat generation through the utilisation of subcooling energy from spent heat carrier in the district heating network, cold water of general-purpose supply, and exhaust gases. The objective of this research is to advance the previously proposed combined heat supply system by integrating the low-temperature energy potential of such sources as subcooled spent heat carrier from the network, general-purpose cold water, and exhaust gases. The system's development aligns with current trends in increasing the share of vapour-compression heat generation, driven by the need to enhance overall energy efficiency. To achieve this objective, the study conducts an analytical investigation into the conditions under which the energy efficiency of the system's structural subsystems can be improved, depending on their operational parameters and thermal conditions during different periods of the heating season. This approach makes it possible to identify the most rational modes of integrating these low-temperature sources into the heat supply system under varying shares of vapour-compression heat generation. The research methodology is based on the further development of a structural-functional diagram of the system, supported by theoretical justification. As a result of the analysis, relationships have been derived for the actual coefficient of performance (COP) and the share of thermal power generated by the heat pump subsystem relative to the total thermal output of the system. These relationships are presented as functions of the operational parameters and temperature conditions of the structural subsystems throughout the heating season. The established dependencies enable a comprehensive assessment of the conditions necessary to improve energy efficiency and increase the share of generated heat, taking into account variations in the temperatures of low-temperature sources, as well as the ratios and distribution of water flows, including cold water used for municipal and industrial purposes. Based on a generalised formula for calculating the actual COP of the heat pump unit, it has been determined that this value significantly depends on the temperature of the spent heat carrier at the outlet of the condenser, prior to its entry into the heat-generating unit. The analysis of the share of thermal power produced by the heat pump subsystem has shown that, under rational values of the intermediate temperature of the spent heat carrier and with decreasing outdoor air temperature, it is possible to significantly increase the proportion of heat generated by the heat pump subsystem. The obtained analytical results provide a foundation for the engineering design of a combined heat supply system as a component of energy-saving technologies for buildings in both municipal and industrial sectors.

References 15, figures 3.

Key words: heat supply, two-stage heat generation, conversion factor.

1. *Haochen Wang, Nefodov D., Richter M., Urbaneck T.* Feasibility Study Concerning Process Heat Supply in District Heating System with Heat Pump. January 2024. Euroheat and Power (English Edition) Euroheat and Power (English Edition).

2. *Arpagaus C.* Hochtemperatur-Wärmepumpen Marktübersicht;StandderTechnikundAnwendungspotenziale. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 201C).

3. *Höges C., Roskosch D., Brach J., Vering C., Venzik V., Müller D.* Investigation of the föteractions between Refrigerant Energy Technol. Vol. 11 (2023).

4. *Nefodov D.; Xiao S.; Richter M.; Urbaneck T.* Nutzung eines Fernwärme-Rücklaufs als Wärmequelle zur Versorgung eines Nahwärmenetzes mit Wärmepumpen - Teil 2. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik VDI Fachmedien 72. (2021) Vol. 6, pp. 59-63.

5. *Ochs F., Magni M., Dermentzis G.* Integration of Heat Pumps in Buildings and District Heating Systems – Evaluation on a Building and Energy System Level. Energies 15(11):3889 May 2022.

6. *Kontu K., Rinne S., Junnila S.* Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. Cite https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077.

7. *22/6. Heat Roadmap Europe*: Large - Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems / A. David [et al.] // Energies, 2017, Vol. 10, No 4. pp. 1–18. https://doi.org/10.3390/en10040578.

8. *Klimenko V. N.* Nekotorye osobennosti vnedreniya parokompressionnykh termicheskikh nasosov dlya utilizatsii sbrosnoy teploty otopitel'nykh kotlov [Some features of the imple¬mentation of vapor compression thermal pumps for recycling waste heat from heating boilers]. Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial heating engineering, 2011, vol. 31, no. 5, pp.42-48 (In Rus.).

9. *Stepanov O. A., Tret'yakova P. A.* Sistema tsentralizovannogo teplosnabzheniyaniya s primeneniem teplovykh nasosov [Centralized heating system using heat pumps]. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvenogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika – Journal of Tyumen State University. Physics and mathematics modeling. Oil, gas, energetics, 2015, vol. 1, no. 4 (4), pp. 43-51. (In Rus.).

10. *Chepurnoy M. N., Tkachenko S. I., Rezident N.V.* Osobennosti primeneniya parokompressionnykh teplo-nasosnykh ustanovok. [Features of the use of vapor compression heat pump units]. Energetika i elektrotekhnika. Nauchnye trudy VNTU – Energetics and electrical engineering. Scientific works of VNTU, 2013, no. 2. (In Rus.).

11. *Batukhtin A. G.* Ispol'zovanie teplovykh nasosov dlya povysheniya teplovoy moshchnosti i effektivnosti sushchestvuyushchikh sistem tsen-tralizovannogo teplosnabzheniya [Using heat pumps to improve the heating capacity and efficiency of existing district heating systems]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti – Scientific and technical statements // SPb GPU, 2010, no. 2, pp. 28-33. (In Rus.).

12. *Petrash V., Baryshev V., Shevchenko L., Geraskina E.* Efficiency of decentralized heat supply based on traditional heat generators with vapour-compression conversion of energy from low-temperature sources. Engineering for rural development. Jelgava, 22.-24.05.2024. pp. 1106–1113. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23. TF228.

13. *Petrash V.D., Baryshev V.P., Shevchenko L.F., Geraskina E.A., Golubenko A.V.* Effectiveness of decentralized heat supply based on traditional heat generators with vapour compression energy transformation of low-temperature sources. Modern construction and architecture, 2024, no. 8, pp. 80-89.

14. *Kisilev N. N., Leonova Yu. N.* Vliyanie temperatury obratnoy setevoy vody na effektivnost' raboty rajonnykh otopitel'nykh kotel'nykh [The influence of return network water temperature on the operating efficiency of district heating boiler houses]. Novosti teplosnabzheniya – Heat supply news, 2017, no. 9, (205). (In Russian).

15. *Andryushchenko A. I.* e.a. Sistema tsentralizovannogo teplosnabzheniya, goryachego i kholodnogo vodosnabzheniya [District heating system, hot and cold water supply]. Pat. no. 2306489 RF, 2007.

Отримано 30.05.2025
Received 30.05.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 621.036.7

СТРУКТУРА ТЕЧІЇ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ПАЛЬНИКАХ З ТРИРЯДНОЮ СИСТЕМОЮ ПАЛИВОПОДАЧІ

Фіалко Н.М.[1], член-кореспондент НАН України, **Шеренковський Ю.В.**[2], канд. техн. наук., **Кліщ А.В.**[3], **Меранова Н.О.**[4], канд. техн. наук, **Альошко С.О.**[5], канд. техн. наук, **Мартюк О.В.**[6]

[1]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, e-mail: nmfialko@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0116-7673,
[2]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: j_sher@ukr.net, https:// orcid.org/0000-0001-7223-8753,.
[3]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: klishch.andrii@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3449-0381
[4]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: : mnata1956@ukr.net, https:// orcid.org/0000-0003-1765-7319
[5]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: s_aleshko@ukr.net https:// orcid.org/0000-0002-0430-7144, .
[6]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, мол. наук. співр, e-mail: martiuk.o76@gmail.com

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.8

Наведено результати комп'ютерного моделювання неізотермічної течії в мікрофакельних пальниках з трирядною подачею паливного газу, призначених для експлуатації за умов різних значень коефіцієнта надлишку повітря. Представлено дані щодо впливу ряду паливоподачі на аеродинаміку пропонованих пальників.

The results of computer modeling of non-isothermal flow in micro-jet burners with three-row fuel gas supply intended for operation at different values of the excess air coefficient are presented. Data on the influence of the fuel supply row on the aerodynamics of the proposed burners are presented.

Бібл. 30, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, мікрофакельні пальники, спалювання природного газу, структура течіїо.

L_l – відстань між зривною кромкою стабілізатора і віссю газоподавальних отворів;
N_R – номер ряду (секції) паливоподачі;
U_x – компонента вектору швидкості вздовж осі абсцис;
U_{mag}' – середньоквадратичні пульсації швидкості;
α_Σ – загальний коефіцієнт надлишку повітря;
CFD – Computation Fluid Dynamic;
DES - Detached Eddy Simulation.

Вступ

Вимоги підвищення ефективності пальникових пристроїв потребують глибокого вивчення їх робочих процесів [1-9]. При цьому дослідження таких процесів, як правило, базується на застосуванні підходу, згідно якого робочий процес підготовки і спалювання палива в цілому поділяється на окремі елементарні процеси. До цих елементарних процесів належать, насамперед, течія і сумішоутворення палива і окиснювача, запалювання і стабілізація полум'я та вигоряння палива. Вказаний поділ на елементарні процеси має велике методичне значення, хоча ці процеси є значною мірою взаємопов'язаними і взаємозалежними.

Серед елементарних процесів спалювання палива на особливу увагу заслуговує аеродинаміка паливного пристрою [6-17]. Це зумовлено тим, що структура течії в пальнику значною мірою визначає ефективність спалювання в цілому і остаточний технологічний результат. Згідно з наявною практикою дослідження аеродинаміки пальникового пристрою вивчається в два етапи. Перший з них є попереднім і відповідає умовам ізотермічної течії [6-25]. На другому етапі розглядається структура течії за умов реагуючих потоків [26-30].

Мета роботи

Мета роботи полягає у встановленні за даними CFD моделювання закономірностей течії реагуючих потоків в мікрофакельному пальниковому пристрої з трирядною системою паливоподачі, призначеному для експлуатації за умов різних значень коефіцієнта надлишку повітря.

Методика проведення досліджень

Розглядаються процеси неізотермічної течії в пальнику, орієнтованому на експлуатацію при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря, $1{,}1 \le \alpha \le 1{,}5$. Дослідженню підлягає ситуація, що відповідає наявності одного паливного модуля в каналі.

Схема модуля досліджуваного пальника наведена на рис.1. Стабілізатор полум'я *2* розташовується в каналі *1*. Через одну з трьох секцій I, II, III подається паливний газ при значенні коефіцієнта надлишку повітря 1,1; 1,3; 1,5 відповідно.

Математична модель досліджуваного процесу має такий вигляд.

Рівняння руху

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho U_i\right)+\frac{\partial\left(\rho U_j U_i\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial\left(\tau_{ij}\right)}{\partial x_j}, \quad i=1,2,3. \quad (1)$$

В рівнянні (1) і в подальших співвідношеннях мається на увазі підсумовування за повторюваним індексом.

Рівняння суцільності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho U_j\right)}{\partial x_j}=0\cdot \quad (2)$$

Рівняння енергії для реагуючих турбулентних потоків, представлене у формі рівняння переносу ентальпії h

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho h\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j h\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_T}{Pr_T}\right)\frac{\partial h}{\partial x_j}\right]+q_h \quad (3)$$

Рівняння збереження маси компонентів реагуючої суміші

$$\frac{\partial \rho_K}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_K U_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu}{Sc_K}+\frac{\nu_T}{Sc_T}\right)\frac{\partial \rho_K}{\partial x_j}+R_K, \quad (4)$$

$K = 1,2,\ldots N\text{-}1,$

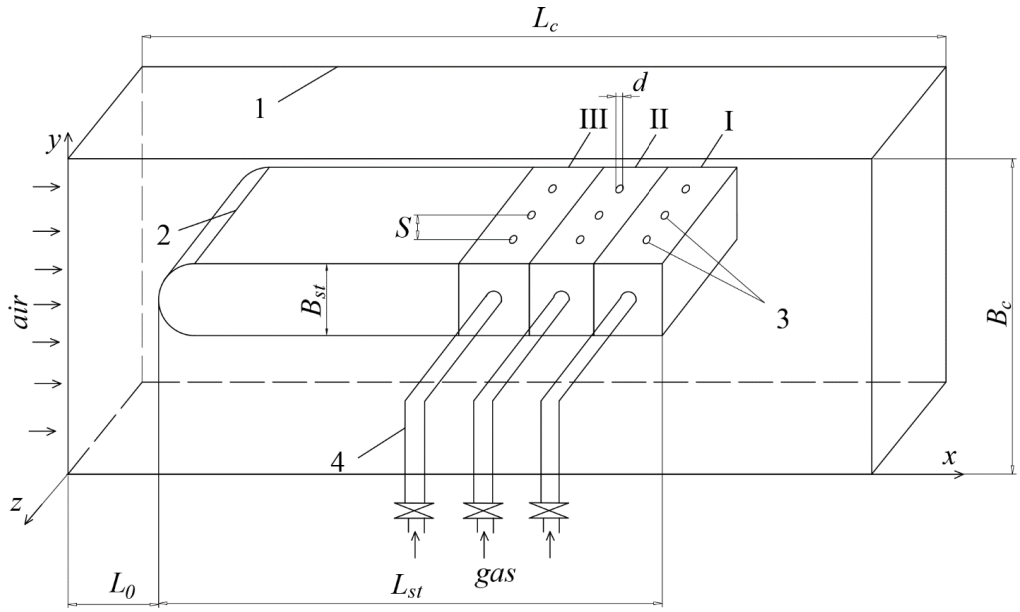


Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника стабілізаторного типу з трирядною системою подачі палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 - газопідвідні патрубки; I, II, III – секції паливоподачі з різними значеннями відносного кроку розташування газоподавальних отворів, що відповідають значенням коефіцієнта надлишку повітря 1,1; 1,3; 1,5

Fig. 1. Schematic diagram of the stabilizer-type microjet burner module with a three-row fuel supply system: 1 - flat channel; 2 - flame stabilizer; 3 - gas supply holes; 4 - gas supply pipes; I, II, III - fuel supply sections with different values of the relative step of the gas supply holes, corresponding to the values of the excess air coefficient of 1.1; 1.3; 1.5

де ρ – густина середовища; t – час; x_j – декартова координата, j =1,2,3; U_j – компоненти вектору швидкості у напрямку x_j ; P – статичний тиск; $\tau_{i,j}$ – компоненти тензора напружень,

$$\tau_{ij} = 2(\mu + \mu_T)S_{ij} - \frac{2}{3}\left[(\mu + \mu_T)\frac{\partial U_n}{\partial x_n} + \rho \cdot k\right]\delta_{ij},$$

k – кінетична енергія турбулентних пульсацій, μ, μ_T – молекулярна і турбулентна динамічна в'язкість, $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера; $S_{i,j}$ – компоненти тензора швидкостей деформацій, $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ Pr – число Прандтля, $\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$, a, ν – температуропровідність і кінематична в'язкість відповідно; Pr_T – турбулентне число Прандтля; q_h – член, що враховує теплоту хімічних реакцій і перенесення теплоти радіацією; ρ_K – парціальна масова густина K-го компонента, $\rho_K = \rho \cdot w_K$, w_K – масова концентрація K-го компонента; N – число компонентів суміші; Sc_K – число Шмідта K-го компонента, $Sc_K = \frac{\nu}{D_K}$, D_K, R_K – коефіцієнт дифузії і швидкість утворення K-го компонента; ν_T – турбулентна кінематична в'язкість; Sc_T – турбулентне число Шмідта.

Граничні умови для системи диференційних рівнянь (1) – (4) визначалися таким чином. У вхідному перетині задавалися постійні значення відповідних величин (швидкостей, концентрацій, температур). У вихідному перетині каналу пальникового пристрою приймалися м'які граничні умови. На твердих границях пальникового пристрою задавалися умови прилипання для швидкостей і рівності нулю перших похідних по нормалі до цих границь від концентрацій компонент суміші. Як теплові умови на бічній поверхні каналу приймалися умови водяного охолодження його стінок. Розв'язування наведеної системи рівнянь здійснювалось на основі застосування DES підходу.

Рис. 2. Картина ліній току у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 2. Picture of flow lines in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections

Результати досліджень та їх аналіз

Характерні результати виконаних досліджень наведено на рис. 2-5. Представлені дані відповідають таким вихідним параметрам: B_{st}=0,03 м; B_c=0,075 м; L_c=1,3 м; L_0=0,1 м; L_{st}=0,2 м; коефіцієнт загромадження прохідного перерізу каналу k_f =0,4 (k_f=B_{st}/B_c). Значення загального коефіцієнта надлишку повітря α_Σ, відстань L_1 між зривною кромкою стабілізатора і відповідними газоподавальними отворами, відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d та швидкість повітря на вході канал U^a_{in} для подачі палива у різні секції наведено в таблиці 1. Інтенсивність турбулентності *Tu* у вхідному перерізі каналу *Tu*=3 %. Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря. Умови експлуатації пальникового пристрою відповідають його постійній теплопродуктивності.

Результати досліджень свідчать, що структура неізотермічної течії при подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів має певні загальні закономірності. Останні стосуються розвитку паливних струменів у зносячому потоці окисника, утворення зон рециркуляції в закормовій області стабілізатора тощо. Однак характеристики течії можуть помітно відрізнятися при подачі паливного газу через перший,

Табл. 1. Конструктивні параметри системи трирядної струменевої подачі палива та значення швидкості на вході в канал

Table 1. Design parameters of the three-row jet fuel supply system and the value of the velocity at the channel inlet

N_R	α_Σ	L1, 10^{-3}·м	d, 10^{-3}·м	S/d	U^a_{in}, м/с
1	1,1	40	3,8	4,21	5,00
2	1,3	55	3,5	4,57	5,91
3	1,5	70	3,3	4,85	6,82

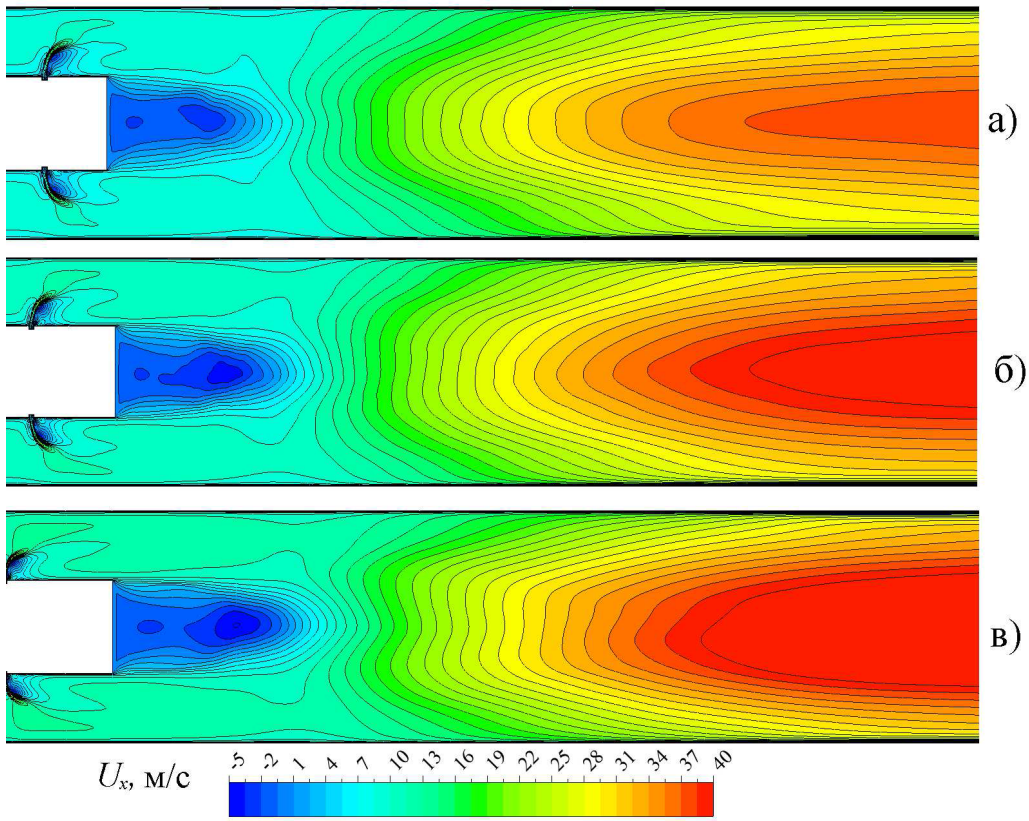


Рис. 3. Поле швидкості U_x у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 3. The velocity field U_x in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections

другий і третій ряд газоподавальних отворів. Так, згідно з даними комп'ютерного моделювання зі збільшенням номера ряду паливоподачі N_R протяжність зони рециркуляції в закормовій області стабілізатора зростає відповідно від 88 мм до 98 мм і далі до 107 мм. Зростає також максимальне по модулю значення швидкості в цій зоні і становить 3,9 м/с; 4,6 м/с та 5,1м/с при подачі палива у першу, другу і третю секцію.

Як свідчать дані на рис. 3, помітними є також відмінності картини полів швидкості $U_x=f(x)$ за умов паливоподачі у різні секції. (На рисунку темні зони за стабілізатором полум'я відповідають від'ємним та низьким значенням швидкості, а затемнені зони біля вихідного перерізу каналу – її високим значенням). А саме, чим більше номер N_R секції подачі паливного газу, тим в цілому вищим є рівень швидкості потоку. При цьому ширина області підвищених швидкостей поблизу виходу з каналу збільшується з ростом номеру секції.

Картину зміни швидкості U_x вздовж осі стабілізатора полум'я для умов подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів ілюструє рис. 4. Як видно, взаємне розташування кривих $U_x = f(x)$ для різних секцій паливоподачі змінюється вздовж даної осі. Так, в закормовій області стабілізатора найбільша швидкість відповідає першій секції паливоподачі, а найменша третій. З віддаленням від задньої стінки стабілізатора відбувається інверсія вказаного взаємного розташування кривих U_x. При цьому в першій із зазначених областей відмінності у величинах швидкостей U_x для різних секцій подачі паливного газу є відносно невеликими. Вони поступово зростають у вказаній зоні інверсії, і на певній відстані від торця стабілізатора полум'я досягають значень, які несуттєво змінюються за потоком.

На рисунку 5 наводяться поля середньоквадратичних пульсацій швидкості U_{mag}' при подачі паливного газу у різні ряди газоподавальних отворів.

Як свідчать представлені дані найвищий в цілому рівень пульсацій швидкості U_{mag}' спостерігається при подачі паливного газу у другу секцію паливоподачі, нижчий – у першу секцію і найнижчий – в третю секцію. Тобто залежність вказаного рівня пульсацій від номеру секції паливоподачі є немонотонною. Це пояснюється дією низки конкуруючих факторів. Зокрема, підвищення швидкості потоку окиснювача з ростом коефіцієнта надлишку повітря і відповідно номера ряду з одного боку може сприяти підвищення рівня пульсацій швидкості, а з другого – його зменшенню з огляду на зниження інтенсивності горіння.

Висновки

1. На основі CFD моделювання одержано дані щодо закономірностей течії реагуючих потоків в мікрофакельних пальниках стабілізаторного типу, призначених для експлуатації при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря (1,1 …1,5).

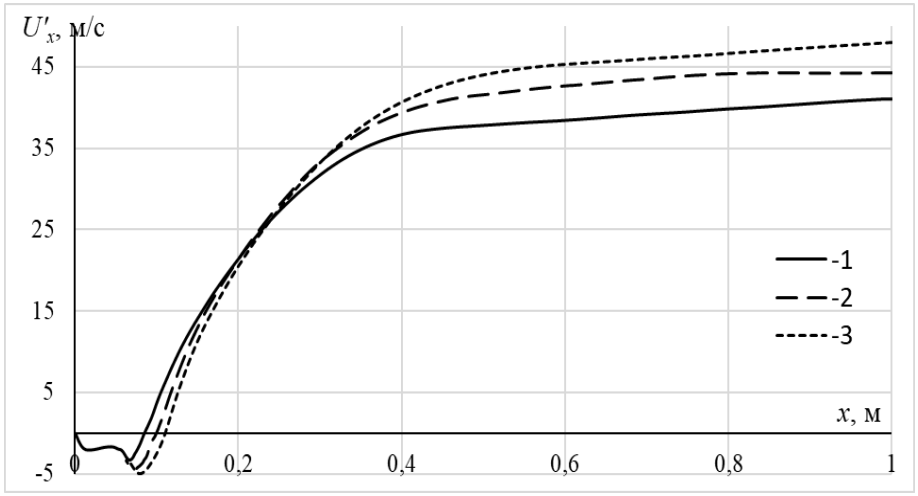


Рис. 4. Розподіл швидкості U_x по довжині каналу за стабілізатором полум'я в площині, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (1), другу (2) та третю (3) секцію

Fig. 4. Distribution of the velocity U_x along the length of the channel behind the flame stabilizer in the plane passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (1), second (2) and third (3) sections

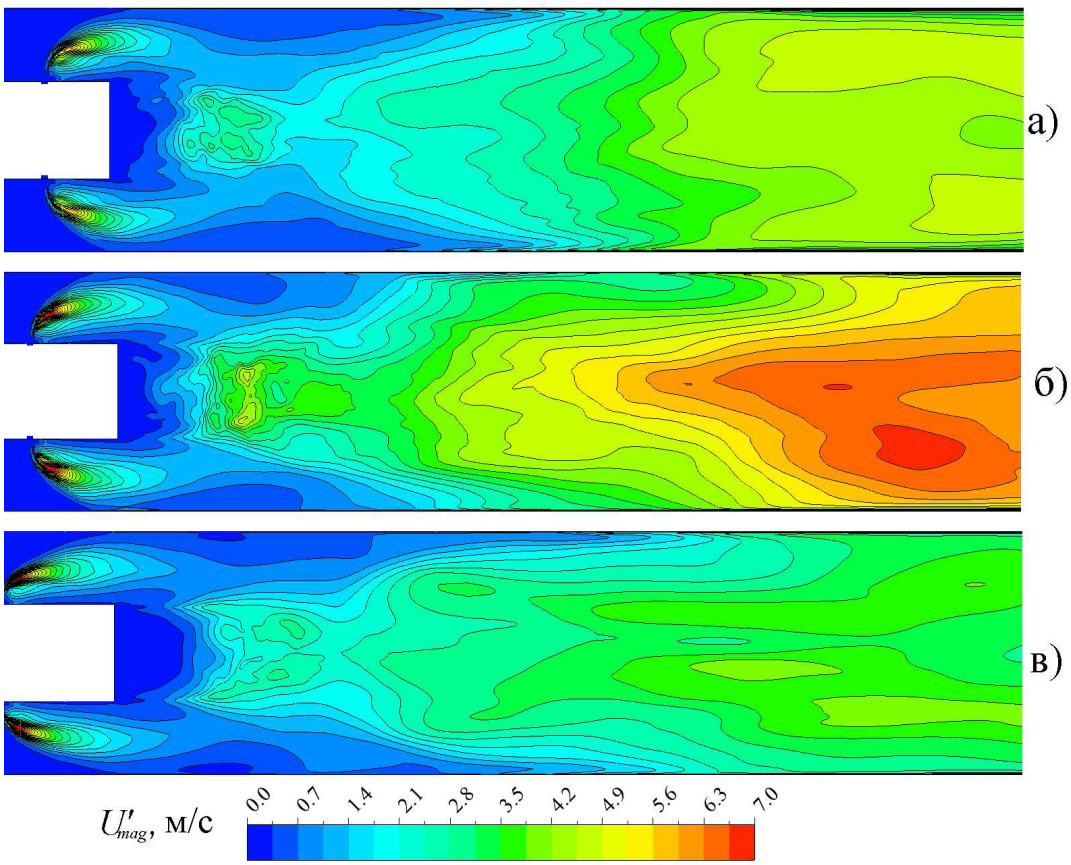


Рис. 5. Поле середньоквадратичних пульсацій швидкості U_{mag}' у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 5. Field of root-mean-square velocity pulsations U_{mag}' in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections

2. Виконано порівняльний аналіз характеристик течії при подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів. Показано, що ці характеристики можуть суттєво залежати від номера ряду паливоподачі.. А саме, з його збільшенням:

- змінюються показники зони рециркуляції за стабілізатором полум'я – помітно зростає її протяжність та максимальні по модулю значення швидкості в цій зоні;
- зростають в цілому рівні швидкості потоку; область підвищених швидкостей поблизу вихідного перерізу каналу охоплює все більшу частину поперечного перерізу каналу;
- спостерігається немонотонний характер зміни в цілому рівня пульсацій швидкості. Найвищому рівню відповідає паливоподача в другу секцію, нижчому – в першу і найнижчому – в третю. Наводиться інтерпретація даного ефекту на основі певних конкуруючих факторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I.* Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. Технологические системы, 2018. 3(38). С. 37-43.

2. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Кутняк О.М.* CFD моделювання робочих процесів пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності нішових порожнин. III International scientific and practical conference «Interaction of society and science: problems and prospects», 2021, October 05-08 London, England. P.436-438.

3. *Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М.* Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток. Технологические системы". 2010. №3(52). С. 72-76.

4. *Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М. Строкин В.Н., Швецова Л.А.* Повышение устойчивости факела при подаче газа в зону рециркуляции за стабилизатором. Технологические системы. 2011. № 3(56). С.74-81.

5. *Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О, Алешко С.А., Полозенко Н.П.* Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха. Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. №1. С. 51-56.

6. *Фиалко Н.М, Прокопов В.Г., Алешко СА., Шеренковский ЮВ., Меранова НО., Абдулин МЗ., Бутовский ЛС., Коханенко ПС., Полозенко НП.* Математическое моделирование динамики течения и смесеобразования при сжигании топлива в горелочных устройствах струйно-нишевого типа. Промислова теплотехника. 2009. Т.31. №7. С.24.

7. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Рокитько К.В.* Особливості течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т.41. №1. С. 11-19.

8. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О.* Аеродинаміка і сумішоутворення в пальниках з багаторядною струменевою системою паливоподачі. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. №2. С. 34-44. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.4

9. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Полозенко Н.П., Чехаровська М.І., Дашковська І.Л., Хміль Д.П., Кліщ А.В., Попружук І.О.* Ефекти впливу номеру ряду струменевої подачі палива на характеристки течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2023. №6(140). С. 65-70. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767

10. *Фіалко Н.М., Майсон М.В., Абдулін М.З., Ганжа М.В., Рокитько К.В., Озеров А.А., Хміль Д.П.* Закономірності течії в прямокутних кільцевих нішах циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. Вип. 240. С. 69-76

11. *Абдулін М. ., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Тимощенко О.Б., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Кліщ А.В.* Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27. №3. С. 131-135.

12. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Абдулин М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Реграги А., Евтушенко А.А.* Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей топлива. Науковий вісник НЛТУ України, 2018. Т.28. № 8. С.117-121.

13. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Кутняк О.Н.* Влияние высоты пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения в микрофакельных горелочных устройствах. Енергетика і автоматика. 2021. №3. С.51-61. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.03.005

14. *Шеренковський Ю. В., Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Меранова Н. О., Альошко С. О., Юрчук В. Л., Кліщ А. В., Бєтін Ю. О., Рокитько К. В., Дашковська І. Л.* Вплив параметрів паливоподачі на закономірності течії в мікрофакельних пальниках. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2024. № 9. С. 88-92 https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10340

15. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алёшко С.А., Полозенко Н.П., Малецкая О.Е., Клищ А.В., Дашковская И.Л.* Закономерности течения в микрофакельных горелочных устройствах с пластинчатыми турбулизаторами потока. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2021. №9. С. 62-67. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7407

16. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовський Л.С., Шеренковский Ю.В., Алешко С.О., Меранова Н.О., Полозенко Н.П.* Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. Промышленная теплотехника. 2011. №2. С. 59-64.

17. *Фиалко Н:.М., Шеренковский Ю.В., Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Алешко С.А., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Озеров А.А., Кутняк О.Н., Бутовский Л.С.* Особенности течения в микрофакельных горелках с подковообразным расположением стабилизаторов пламени. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 (1). С. 191-199.

18. *Fialko N., Meranova N., Sherenkovskii Ju., Aleshko S., Prokopov V., Abdulin M., Babak V., Korzhyk V., Zhelykh V., Khaskin V.* Establishment of regularities of isothermal flow and mixture formation in microjet burners with three-row jet fuel supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6(8 (120). P.65–72. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267891

19. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О.,Алешко С.А., Коханенко П.С., Полозенко Н.П.* Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени. Промышленная теплотехника, 2010. №6. С. 28-36.

20. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Рокитько К.В.* Структура течії в пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням для реагуючих потоків та ізотермічних умов. Теплофізика та теплоенергетика. 2020. Т. 42. №1. С.19-26. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.2

21. *Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковский Ю. В., Меранова Н. О., Алешко С. А., Майсон Н. В., Полозенко Н.П., Степанова А. И.* CFD моделирование температурных полей в горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени. Технологические системы. 2016. №2(75). С. 92-99.

22. *Фиалко Н.М., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Бутовский Л.С.* Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. Технологические системы. 2012. 58/1. С.52-57.

23. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Полозенко Н.П., Малецька О.Є.* Вплив ширини стабілізатора на аеродинамічні та теплові характеристики систем охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв. Науковий вісник НЛТУ України. 2013. 23.7. С.83-87.

24. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В.* Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 72-76.

25. *Фіалко Н.М., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Тимощенко О.Б., Кліщ А.В., Реграгі А., Ганжа М.В.* Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності прямокутних нішових порожнин. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2020. №12. С.43-48. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-12-6214

26. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Юрчук В.Л., Полозенко Н.П., Рокитько К.В., Дашковська І.Л., Ганжа М.В., Сороковой Р.Я.* Особливості течії і теплообміну у внутрішній порожнині стабілізатора полум'я за наявності та відсутності ніш на його бічних поверхнях. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2021. №16. С.78-83. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-16-7654

27. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Юрчук В.Л., Полозенко Н.П., Рокитько К.В., Реграгі А., Ганжа М.В*. Вплив навантаження вогнетехнічного об'єкта на характеристики течії і теплообміну у системі охолодження стабілізатора полум'я. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2021. №17. С.23-29. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-17-7715

28. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskyi Yu.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V* Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192

29. *Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Сірий О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А. , Кліщ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я.* Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НЛТУ. 2018.28. №3. С.97-100.

30. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.А., Ганжа М.В., Юрчук В.Л., Швецова Л.А.* Комп'ютерне моделювання процесів теплопереносу в мікрофакельних пальникових пристроях з термобар'єрними покриттями. Науковий вісник НЛТУ України, 2017. Т. 27. № 5. С. 130-133.

FLOW STRUCTURE DURING COMBUSTION OF NATURAL GAS IN BURNERS WITH A THREE-ROW FUEL SUPPLY SYSTEM

Fialko N.M.[1], Sherenkovskyi Ju.[2], Klishch A.[3], Meranova N.[4], Aloshko S.[5], Martiuk O.[6]

[1]Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net
[2]PhD (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/0000-0001-7223-8753, e-mail: j_sher@ukr.net
[3]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Junior Researcher, orcid.org/0009-0001-3449-0381, e-mail: klishch.andrii@gmail.com
[4]PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0003-1765-7319, e-mail: mnata1956@ukr.net
[5]PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net
[6]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Junior Researcher, e-mail: martiuk.o76@gmail.com

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.8

The objective of the work is to establish the regularities of the flow of a single gas in micro-jet burner devices with a three-row fuel supply system. The burner devices under consideration are intended for operation under conditions of variable values of the total excess air coefficient, 1.1 ... 1.5. The objective of the study was to determine the effects of the influence of the row number of gas supply holes on various characteristics of the non-isothermal flow in the proposed burners. CFD modeling based on the DES approach was used as a research method.

Based on the results of the comparative analysis of the flow characteristics when feeding fuel gas to different rows of gas supply holes, it is shown that these characteristics can significantly depend on the row number of the fuel supply. It was found that with an increase in the row number, the indicators of the recirculation zone behind the flame stabilizer change significantly. The levels of flow rates, velocity pulsations, etc.

The research results can be used in the design of micro-flare burners of the stabilizer type.

References 30, Fig. 5, Tabl. 1.

Key words: computer modeling, micro-flare burners, natural gas combustion, flow structure.

1. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I.* Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.] 2018. 3(38). P. 37-43.

2. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Kutnyak O.M.* [CFD modeling of working processes of burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of niche cavities]. III International scientific and practical conference «Interaction of society and science: problems and prospects», 2021, October 05-08 . London, England. P.436-438. (in ukr.)

3. *Butovsky L.S., Granovskaya E.A., Fialko N.M.* [Stability of the torch behind a flat stabilizer when gas is supplied by injection into the air flow]. Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.] 2010. №3(52). P. 72-76. (in rus.)

4. *Butovsky L.S., Granovskaya E.A., Fialko N.M., Strokin V.N., Shvetsova L.A.* [Increasing the stability of the torch when feeding gas into the recirculation zone behind the stabilizer]. Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.] 2011. № 3(56). P.74-81. (in rus.)

5. *Fialko N.M., Butovsky L.S., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P.* [Computer modeling of the mixture formation process in stabilizer-type burner devices with gas supply by injection into the blowing air flow]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2011. V. 33. №1. P. 51-56. (in rus.)

6. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovskiy L.S., Kokhanenko P.S., Polozenko N.P.* [Mathematical modeling of flow dynamics and mixture formation during fuel combustion in jet-niche burner devices]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2009. V.31. №7. P.24. (in rus.)

7. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Rokitko K.V.* [Features of flow and mixture formation in micro-jet burners with asymmetric fuel distribution]. Teplofizika ta teploenerfetika [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2019. V.41. №1. P. 11-19. (in ukr.)

8. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A.* [Aerodynamics and mixture formation in burners with a multi-row jet fuel supply system]. Teplofizika ta teploenerfetyka [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2023. №2. P. 34-44. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.4 (in ukr.)

9.*Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Chekharovskaya M.I., Dashkovskaya I.L., Khmil D.P., Kleshch A.V., Popruzhuk I.A.* [Effects of the jet fuel feed row number on the flow and mixture formation characteristics in micro-jet burner devices]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka" [International Scientific Journal "Internauka"]. 2023. №6(140). P. 65-70. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767 (in ukr.)

10. *Fialko N.M., Maison M.V., Abdulin M.Z., Ganzha M.V., Rokitko K.V., Ozerov A.A., Khmil D.P.* [Regularities of flow in rectangular annular niches of cylindrical stabilizer burners of different capacities]. Naukovyy visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]. 2016. Issue. 240. P. 69-76. (in ukr.)

11. *Abdulin M., Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Butovskiy L.S., Timoshchenko O.B., Yurchuk V.L., Ivanenko G.V., Klishch A.V.* [Structure of the flow in the turbulator system - a niche cavity]. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU]. 2017. V. 27. №3. P. 131-135. (in ukr.)

12. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Abdulin M.Z., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Olkhovskaya N.N., Regragi A., Evtushenko A.A*. Computer modeling of flow in micro-jet burners with asymmetric fuel supply. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018. V.28. № 8. P.117-121. (in rus.)

13. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Kutnyak O.N.* [Influence of the height of plate flow turbulators on the flow characteristics in micro-fjet burner devices]. Energetika í avtomatika. [Energy and Automation]. 2021. №3. P.51-61. http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.03.005/ (in rus.)

14. *Sherenkovsky Yu. I., Fialko N. M., Prokopov V. G., Meranova N. O., Aleshko S. O., Yurchuk V. L., Klishch A. V., Betin Yu. O., Rokitko K. I., Dashkovskaya I. L*. [Influence of fuel supply parameters on flow patterns in microflare burners]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka" [International Scientific Journal "Internauka"]. 2024. № 9. P. 88-92 https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10340 (in ukr.)

15. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Maletskaya O.E., Klishch A.V., Dashkovskaya I.L.* [Flow patterns in micro-jet burner devices with plate flow turbulators]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka" [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №9. p. 62-67. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7407 (in rus.)

16. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovsky L.S., Sherenkovskiy Ju.V., Aleshko S.O., Meranova N.O., Polozenko N.P.* [Features of the flow of fuel and oxidizer with an echeloned arrangement of flame stabilizers]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2011. №2. p. 59-64. (in rus.)

17. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Prokopov V.G., Polozenko N.P., Aleshko S.A., Maletskaya O.E., Milko E.I., Ozerov A.A., Kutnyak O.N., Butovskiy L.S.* [Features of the flow in microjet burners with a horseshoe-shaped arrangement of flame stabilizers]. Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]. 2015. № 209 (1). P 191-199. (in rus.)

18. *Fialko N., Meranova N., Sherenkovskii Ju., Aleshko S., Prokopov V., Abdulin M., Babak V., Korzhyk V., Zhelykh V., Khaskin V.* Establishment of regularities of isothermal flow and mixture formation in microjet burners with three-row jet fuel supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6(8 (120). P.65–72. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267891

19. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovsky L.S., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Kokhanenko P.S., Polozenko N.P.* [Modeling the structure of isothermal flow in an echeloned lattice of flat stabilizers in flame burners]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2010. №6. P. 28-36. (in rus.)

20. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Ju.V., Alyoshka S.O., Meranova N.O., Rokitko K.V.* [Flow structure in burner devices with asymmetric fuel distribution for reacting flows and isothermal conditions]. Teplofizika ta teploenerfetika [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2020. V. 42. №1. P.19-26. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.2 (in ukr.)

21. *Fialko N. M., Prokopov V. G., Sherenkovskiy Ju. V., Meranova N. O., Aleshko S. A., Maison N. V., Polozenko N. P., Stepanova A. I.* [CFD modeling of temperature fields in burner devices with echeloned arrangement of flame stabilizers]. Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.] 2016. №2(75). P. 92-99. (in rus.)

22. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Butovskiy L.S.* [Efficiency of cooling systems of jet-stabilizer type burner devices]. Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.]. 2012. 58/1. P52-57. (in rus.)

23. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Polozenko N.P., Maletskaya O.E.* [Influence of stabilizer width on aerodynamic and thermal characteristics of cooling systems of microjet burner devices]. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU]. 2013. 23.7. P.83-87. (in ukr.)

24. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Maletskaya O.E., Nochovny A.V.* [Analysis of the influence of the geometric shape of a niche cavity on the aerodynamic drag of the channel]. Promyshlennaia teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2012. №1. P. 72-76. (in rus.)

25. *Fialko N.M., Polozenko N.P., Kutnyak O.M., Timoshchenko O.B., Klishch A.V., Regragi A., Ganzha M.V.* [Modeling of turbulent flows in micro-jet burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of rectangular niche cavities]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal “Internauka” [International Scientific Journal "Internauka"]. 2020. №12. P.43-48. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-12-6214 (in ukr.)

26. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Yurchuk V.L., Polozenko N.P., Rokitko K.V., Dashkovskaya I.L., Ganzha M.V., Sorokov R.Ya.* [Features of flow and heat transfer in the internal cavity of a flame stabilizer with and without niches on the side surfaces]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal “Internauka” [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №16. P.78-83. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-16-7654 (in ukr.)

27. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Yurchuk V.L., Polozenko N.P., Rokitko K.V., Regragi A., Ganzha M.V.* [Influence of the load of a fire-engineering object on the characteristics of flow and heat transfer in the cooling system of a flame stabilizer]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal “Internauka” [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №17. P.23-29. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-17-7715 (in ukr.)

28. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskyi Ju.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V* Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192

29. *Abdulin M.Z., Fialko N.M., Timoshchenko O.B., Sery A.A., Sherenkovskiy Ju.V., Milko E.I., Ozerov A.A., Klishch A.V., Olkhovskaya N.M., Shvetsova L.Ya.* [Temperature regimes of reverse current zones in the near wake of cylindrical flame stabilizers]. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018.28. №3. P .97-100. (in ukr.)

30. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Ganzha M.V., Yurchuk V.L., Shvetsova L.A.* [Computer modeling of heat transfer processes in micro-flare burner devices with thermal barrier coatings]. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU], 2017. T. 27. № 5. C. 130-133. (in ukr.)

Отримано 04.06.2025
Received 04.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 66.069.84; 66.084; 628.316; 628.32

ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ КИСЛОГО КОНДЕНСАТУ ДИМОВИХ ГАЗІВ. ПОПЕРЕДНЄ ОЧИЩЕННЯ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТА ПОДАЛЬШЕ ВИКОРИСТАННЯ

Целень Б. Я.[1] к.т.н., **Радченко Н. Л.**[2] к.т.н., **Іваницький Г. К.**[3] д.т.н., **Недбайло А. Є.**[4] к.т.н., **Щепкін В.І.**[5]

[1]Інститут 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: b0d@ukr.net, orcid.org/0000-0001-5213-0219
[2]Інститут 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, orcid.org/0000-0002-5315-1609
[3]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: gergey4@gmail.com , orcid.org/0000-0002-0486-2359
[4]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н. e-mail: anna.nedbailo18@gmail.com , orcid.org/0000-0002-8590-5823
[5]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, головний технолог відділу тепломасообміну в дисперсних системах, e-mail: ittf_tds@ukr.net , orcid.org/0009-0000-5717-4835

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.9

У статті розглянуто сучасні підходи до очищення кислого конденсату димових газів, що утворюється при роботі котелень на природному газі. Запропоновано комплексну технологію очищення, яка включає знезалізнення, декарбонізацію та видалення оксидів азоту з подальшим доочищенням до рівня дистильованої води. Проведено експериментальні дослідження та підтверджено ефективність запропонованої схеми для повторного використання очищеного конденсату, зокрема як живильної води або для використання у водневих електролізерах.

The article examines modern approaches to the treatment of acidic condensate from flue gases produced during the operation of natural gas-fired boiler plants. A comprehensive purification technology has proposed, which includes iron removal, decarbonization, and the elimination of nitrogen oxides, followed by post-treatment to the level of distilled water. Experimental studies conducted and confirmed the effectiveness of the proposed scheme for the reuse of the treated condensate, particularly as feedwater or for use it in hydrogen electrolyzers.

Бібл. 14, рис. 6.

Ключові слова: кислий конденсат, гідродинамічна кавітація, декарбонізація, очищення, pH, знезалізнення.

ψ – коефіцієнт очищення від домішок;
L – довжина фільтруючого шару, м;
H – напруженість магнітного поля, кА/м;
ν – швидкість фільтрування, м/с;
τ – час обробки, хв;
C – концентрація, мг/кг;
НБ – нейтралізатор безреагентний.

Вступ. В останні роки відбувається активна модернізація обладнання на газових котельнях в Україні, особливо в рамках програм з підвищення енергоефективності та зменшення шкідливих викидів. Традиційні котли з ККД до 85% замінюють на нові конденсаційні, збільшуючи ККД до 95…98% , встановлюють сучасні пальники та системи автоматизації, системи безпеки. Кислий конденсат димових газів, отриманий на модернізованій котельні є досить чистою рідиною, подібною за показниками до дистиляту з високим вмістом діоксиду вуглецю при використанні сучасного обладнання на енергетичних підприємствах.

Водночас багато котелень, в тому числі старих центральних, все ще працюють на застарілому обладнанні, яке вимагає модернізації, особливо в невеликих містах України. Це пов'язано з обмеженими інвестиціями в модернізацію та руйнуваннями, викликаними війною. Наприклад, в Миколаєві, Києві та Житомирі котельні та тепломережі значно постраждали від обстрілів, що ускладнює їх відновлення та модернізацію.

Згідно з даними Міністерства енергетики, на осінь 2023 року Україна потребувала близько 370 модульних котелень для відновлення теплопостачання, що свідчить про роль, яку відіграють застарілі системи [1].

Хоча природний газ вважається відносно чистим паливом, конденсат, отриманий після охолодження димових газів в результаті його згорання у випадках використання немодернізованого обладнання містить забруднюючі речовини, які можуть бути присутні в такому конденсаті, і включають діоксид вуглецю, оксиди азоту та оксиди заліза. Діоксид вуглецю (CO_2) утворюється внаслідок повного згоряння метану і у водному середовищі може утворювати вугільну кислоту (H_2CO_3), що призводить до зміщення pH конденсату в сторону кислого середовища. Як правило, кислотність конденсату складає 4 од. pH, що обумовлено, в основному, наявністю вугільної кислоти. Утворення оксидів азоту NO_x пов'язане з високотемпературним згорянням природнього газу і відбувається внаслідок реакції між молекулярним азотом (N_2) і киснем (O_2) повітря при температурі згорання вище 1200…1300 ˚С. Також надлишок кисню під час згорання природного газу може збільшувати утворення термічного NO_x, оскільки доступний більший об'єм кисню для реакцій. На виході з труби оксиди азоту на 85…90 % складаються з монооксиду азоту (NO) і на 10…15 % з діоксиду азоту (NO_2). В момент потрапляння в атмосферу відбувається швидке окислення NO в NO_2.

Наявність оксидів заліза в конденсаті обумовлена, в першу чергу, корозією поверхонь контактного обладнання (зокрема теплообмінників, димарів або котлів, якщо вони виготовлені з заліза або сталевих сплавів) при їх контакті з кислим конденсатом. Наявність вологи, кисню та кислот у конденсаті провокують утворення в ньому оксидів заліза у вигляді магнетиту Fe_3O_4, гематиту Fe_2O_3, гідроокисів $Fe(OH)_3$ і $Fe(OH)_2$. Наразі існує багато різновидів методів очищення кислого конденсату від домішок сполук заліза, однак попереднє очищення димових газів від оксидів азоту перед їх потраплянням в утилізатори теплоти призводить до нижчого вмісту домішок заліза в кислому конденсаті через зниження його агресивної дії на поверхні обладнання з якими він контактує.

Також в конденсаті серед забруднювачів може міститись незначна кількість летких органічних сполук та твердих частинок. Однак, їх концентрації незначні, оскільки газ має високий ступінь очищення.

Використання якісного сучасного обладнання в котельнях та ТЕЦ дозволяє уникнути утворення окисів азоту та заліза, однак досить багато об'єктів теплоенергетичного сектору досі потребують модернізації, тому існує необхідність розроблення технології та обладнання для нейтралізації та очищення конденсату від забруднюючих речовин і доведення його за хімічними показниками до показників близьких до дистильованої води. Склад кислого конденсату щодо вмісту забруднюючих сполук свідчить про те, що його очищення потрібно здійснювати за трьома базовим напрямками: декарбонізація, очищення або недопущення утворення оксидів азоту і вилучення заліза.

Отже, метою нашого дослідження є розробка ефективної технології очищення конденсату, щоб зробити його придатним для подальшого використання як живильної води в котлоагрегатах або у водневих електролізерах. У зв'язку з цим, завданнями дослідження є розроблення режимів та підбір обладнання для очищення кислого конденсату від трьох основних забруднюючих компонентів та кінцеве доочищення до показників близьких до дистильованої води з метою подальшого його використання як живильної води в котлоагрегатах або використання для електролізерів.

Аналіз досліджень останніх років [2–4] показав можливість ефективного повторного застосування очищеного конденсату, зокрема, як води для живлення парових котлів, що дає змогу знизити витрату свіжої води та заощаджувати кошти на її підготовці. Окрім цього, очищений конденсат можна використати в технологічних процесах, наприклад, для промивання обладнання, зволоження, приготування розчинів, як резервне джерело води для протипожежних систем тощо. Є роботи [4], які свідчить про зростаючий інтерес до застосування конденсату наближеного після очищення за своїм складом до дистильованої води для обробки в електролізерах. Отриманий після електролізу водень можна використовувати для різних цілей, включаючи енергетичні або хімічні процеси чи використовувати як потенційне екологічно чисте паливо.

Використання очищеного конденсату для обробки в електролізері може стати ефективним способом вторинного використання ресурсів, підвищуючи загальну енергоефективність і знижуючи негативний екологічний вплив. Однак, для реалізації такого підходу потрібне ретельне опрацювання технічних та економічних аспектів, щоб забезпечити його практичну доцільність.

Вилучення окисів заліза з кислого конденсату. Очищення кислого конденсату від домішок заліза має забезпечувати максимальне видалення двох- та тривалентного заліза з розчину, щоб забезпечити відповідність отриманого конденсату згідно нормативних вимог до води для підживлення котлоагрегатів та води для використання в електролізерах.

Для очищення конденсату від заліза застосовують різноманітні фільтри, електромагнітні флокулятори, магнітні фільтри-сепаратори різної конструкції, які спрямовані на видалення заліза розчиненої і нерозчинної форми [5, 6].

Проведений аналіз фільтраційних установок з фільтрами на основі сульфовугілля (для температури конденсату до 50 ºС) або кополімеру стиролу і дивінілбензолу, а також магнітних фільтрів показав, що серед них найбільш універсальним (згідно температурних режимів, режимів тиску та початкової концентрації часток заліза в рідині) та ефективним є комбінація магнітного фільтра з подальшим використанням катіонної фільтрації.

Магнітні фільтри встановлюють перед катіонітними. Загальна схема апарата даного типу представлена на рис. 1 [7].

Відома також конструкція пристрою електромагнітного сепаратора продуктивністю 50 т/год з висотою засипки кульок в корпусі фільтра близько 1000 мм, навкруги корпусу розташовані п'ять мідних котушок з 2400 витками кожна. За даними тих самих джерел ефективним вважається електромагнітний фільтр (сепаратор) для видалення феромагнітних забруднень з рідинних середовищ продуктивністю від 100 до 1500 т/год, які можна експлуатувати при температурі до 350 ºС і тиску до 40 МПа. Процес очищення кульок від затриманих ними продуктів корозії автоматично регулюється установленим у верхній частині корпусу фільтра індуктивним кульовим детектором. Очищений конденсат протікає через фільтр знизу вверх. При накладанні магнітного поля всередині фільтра між кульками виникають високі градієнти напруження поля, в результаті чого феромагнітні забруднення, присутні в рідині, переміщуються в область максимальної напруженості – до магнітних полюсів кульок, де і відбувається їх відкладення. Швидкість фільтрування, відносно довільного перерізу фільтра, може змінюватись від 0 до 40 см/с без погіршення ефекту очищення. Економічно оптимальна швидкість фільтрування становить 30 см/с (1080 м/г), втрата напору незабрудненого фільтру становить 0,08-0,1 МПа, забрудненого – 0,1-0,12 МПа. Ємність кульок за продуктами корозії становить 2 г/кг. Відділені магнітні окиси заліза, мають велику активну поверхню, адсорбують частково як немагнітні окиси інших металів так і неметалеві забруднення.

Безумовна перевага електромагнітних фільтрів полягає у можливості їх практично не обмеженого застосування відносно значень тиску і температури, швидкості фільтрування, коефіцієнта очищення і діапазону дисперсності видалених оксидів заліза, яка вища, ніж у більшості фільтраційних методів (вилучаються частинки розміром 0,1-0,3 мкм). Залежно від початкової концентрації коефіцієнт очищення досягає 80-98 %. Крім цього, електромагнітні фільтри мають низьке споживання електроенергії, малі габарити та витрати води на регенерацію, а тому при розробленні технологічної схеми очищення конденсату до вимог електролізерів для видалення заліза прийнято рішення використати електромагнітний фільтр (рис. 1).

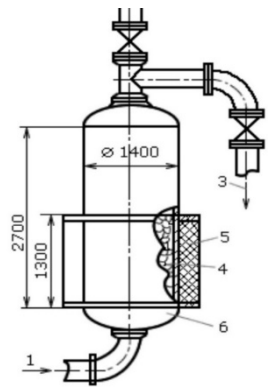


Рис. 1. Схема електромагнітного фільтра: 1 – вхід конденсату; 2 – вихід конденсату; 3 – злив конденсату в дренаж при очищенні фільтра від затриманих продуктів корозії; 4 – сталеві кульки; 5 – електромагнітна котушка для створення магнітного поля; 6 – корпус фільтра з немагнітної сталі

Fig. 1. Scheme of the electromagnetic filter: 1 – condensate inlet; 2 – condensate outlet; 3 – condensate drainage into the drainage when cleaning the filter from retained corrosion products; 4 – steel balls; 5 – electromagnetic coil for creating a magnetic field; 6 – filter made of non-magnetic steel

Вилучення оксидів азоту. Одними з забруднюючих речовин в кислому конденсаті є окиси азоту, які утворюються внаслідок високотемпературних процесів у факелі горіння та при окислені азотовмісних сполук в самому паливі. На стадії отримання димових газів за допомогою методу селективного каталітичного відновлення можна запобігти потраплянню оксидів азоту, як в навколишнє середовище, так і в конденсат продуктів згорання природнього газу. Метод ґрунтується на перетворенні NO_x на азот і воду шляхом реакції з аміаком (NH_3) або сечовиною в присутності каталізатора. Процес селективного каталітичного відновлення, дозволяє перетворювати NO_x на нешкідливі азот і воду з ефективністю до 90-95 % при відповідних умовах. Це робить його одним з найефективніших способів зниження викидів оксидів азоту. Порівняно з іншими способами нейтралізації процес селективного каталітичного відновлення дозволяє уникнути утворення шкідливих побічних продуктів, які можуть виникати при взаємодії з іншими хімічними реагентами. Однак, впровадження такого методу призводить до високих капітальних витрат.

Для видалення оксидів азоту (NO_x) з конденсату також можна використати намивні іонітові фільтри з використанням порошкових сумішей катіонітного і аніонітного типів. Ця технологія є більш ефективною при підвищенні температури конденсату, оскільки призводить до часткового руйнування гідратних оболонок і локалізації заряду іонів позитивно впливаючи на сорбцію гідратних оболонок на іонітах. Крім того, при підвищенні температури конденсату знижуються втрати напору в фільтрі. Негативними показниками застосування порошкоподібних фільтрів є їх висока собівартість, значні втрати часу на перезавантаження, високі витрати електроенергії та розчину для регенерації.

Для очищення конденсату від солей застосовують фізичні методи, які реалізуються переважно в апаратах мембранного типу [8]. Відомий мембранний апарат призначений для розділення, очищення і концентрування солей. Конструкція включає зворотно осмотичний апарат, насосну станцію, блоки для промивання і систему керування. Принцип роботи цього апарата ґрунтується на явищі зворотного осмосу з примусовим переходом рідини з низькою концентрацією розчинених солей під впливом гідростатичного тиску через мембранні елементи. До переваг мембранних технологій відносять їх простоту та компактність, а до недоліків – невисоку продуктивність та високу вартість мембран. Очищення багатокомпонентних сумішей рідин найчастіше вимагає комбінування цього методу з іншими методами очищення рідин від аміачної селітри.

Тому для очищення конденсату від оксидів азоту передбачається використання комплексного підходу, який включає на першій стадії обробку конденсату спочатку в установці нейтралізатора безреагентного (далі – НБ) розробленого в ІТТФ НАН України [2, 9, 10] одним з завдань якої є інтенсифікація перебігу хімічної реакції утворення аміачної селітри і забезпечення повноти хімічної реакції та на другій – видалення в мембранному апараті продуктів реакції – аміачної селітри разом з іншими залишками солей.

Декарбонізація кислого конденсату. Технології нейтралізації кислого конденсату димових газів базуються, зокрема, на використанні хімічних речовин для коригування величини pH середовища в лужний бік. Головним недоліком вищезгаданих способів є забрудненість нейтралізованого конденсату продуктами реакції нейтралізації і, в окремих випадках, їх висока вартість, яка може досягати 1 євро/Гкал [3].

Іншим методом нейтралізації кислого конденсату є використання масообмінних процесів в декарбонізаторах, де створюється велика поверхня контакту фаз між повітрям і конденсатом. На сьогодні застосування декарбонізаторів для нейтралізації кислого конденсату ускладнене через значні матеріальні та енергетичні витрати і не отримало широкого розповсюдження [11].

В ІТТФ НАН України було проведено ряд фундаментальних досліджень спрямованих на розроблення технології безреагентної нейтралізації конденсату димових газів після спалювання природного газу на теплоенергетичних підприємствах. Дані досліджень описані в ряді наукових праць [2, 9, 12, 13]. Ця технологія вирішує задачу різкого скидання тиску до значень, що достатні для активації та росту бульбашок, створення плівкової течії, а також подальшого виділення неконденсованих газів, що обумовлює ведення процесу при тисках в області тиску насиченої пари. Основним процесом технології є гідродинамічна кавітація, а точніше, перша стадія цього процесу, де відбувається активація зростання парогазових бульбашок та наступне їх вилучення з рідини у вакуумній камері установки НБ. Перевагами даної технології є легка інтеграція установки в технологічну схему котельні, екологічність процесу, так як вилучення діоксиду вуглецю не потребує застосування додаткових хімічних речовин, висока продуктивність обладнання та його енергоефективність. Застосування режимів ведення процесу при низьких тисках дає можливість видалення до 98 % розчинених газів [2]. Тому інтеграція технологій вилучення заліза, оксидів

азоту і безреагентної нейтралізації рідини в комплексну технологію очищення конденсату димових газів є перспективним та необхідним напрямком розвитку енергетичних технологій.

Розроблення технологічної схеми очищення конденсату до вимог використання в електролізері.

На основі проведеного аналізу технологій очищення конденсату запропоновано комплексну технологічну схему (рис. 1) направлену на три базові напрямки його очищення: декарбонізацію, вилучення заліза та оксидів азоту.

На першій стадії обробки накопичений у ємності 6 конденсат шляхом регулювання подачі вентилем 10 за допомогою циркуляційного насоса 5 надходить на першу стадію очищення – вилучення оксидів заліза. Процес вилучення оксидів заліза здійснюють в електромагнітному фільтрі 2, що представляє собою корпус, виконаний з аустенітної (немагнітної) сталі. Навколо корпусу по висоті засипки намагнічуваних кульок знаходяться електромагнітні котушки. Фільтрування проводиться знизу вверх зі швидкістю потоку рідини v = 500 м/год. Намагнічувані кульки виготовлені зі спеціальної магнітної сталі діаметром D = 6 мм.

Після вилучення оксидів заліза конденсат надходить на другу стадію очищення – вилучення діоксиду вуглецю. Процес перебігає при застосуванні режиму рециркуляції в контурі НБ – РПА 1, де РПА (роторно-пульсаційний апарат, далі – РПА), крім нейтралізації, одночасно забезпечує циркуляцію рідини у контурі протягом заданого часу обробки, а вакуумний насос 4 створює вакуум в робочій камері НБ та забезпечує вилучення надлишкових газів. Пристрій НБ 1 складається з ємності двокамерної для здійснення процесу вилучення CO_2 з конденсату у вакуумну ємність, що поділена в середині перегородкою на дві рівні частини – камеру приймальну та камеру рециркуляційної обробки конденсату, що з'єднуються між собою щілинами перетікання над перегородкою і під нею. Камера рециркуляційної обробки з'єднана пристроями підведення і відведення конденсату з РПА. Пристрій відведення конденсату з РПА в камеру рециркуляції оснащений розпилювальним пристроєм. Ємність разом з РПА утворюють

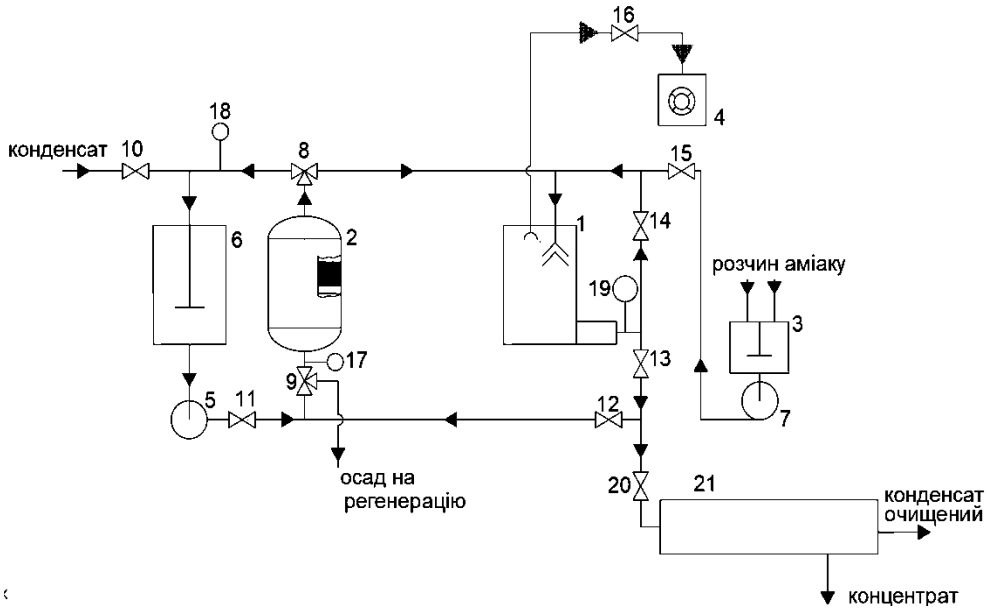


Рис. 2. Технологічна схема очищення конденсату до вимог використання в електролізері: 1 – нейтралізатор безреагентний (НБ); 2 – електромагнітний фільтр; 3 – пристрій подачі аміаку; 4 – насос вакуумний; 5 – насос циркуляційний; 6 – ємність накопичувальна; 7 – насос дозатор; 8, 9 – вентилі триходові; 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 – вентиль; 17, 18, 19 – мановакуумметр

Fig.2. Technological scheme of condensate treatment to meet the requirements for use in an electrolyzer: 1 – non-reagent neutralizer (NR); 2 - electromagnetic filter; 3 - ammonia supply device; 4 - vacuum pump; 5 - circulation pump; 6 - storage tank; 7 - dosing pump; 8, 9 - three-way valves; 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 - valve; 17, 18, 19 – manovacuum meter

рециркуляційний контур для обробки рідини впродовж заданого часу. РПА складається з проточної частини в яку входять ротор, статор та крильчатка.

Після завершення стадії вилучення діоксиду вуглецю в НБ дозовано надходить підготовлений розчин аміаку з ємності 3 насосом-дозатором 7 і в режимі рециркуляції в контурі НБ – РПА 1 відбувається обробка конденсату. Дозування аміаку в пропорції на 100 л рідини становить 0,25 кг аміаку. Пристрій подачі аміаку складається з ємності приготування аміачного розчину та насоса дозатора для його подачі в НБ для обробки в режимі рециркуляції та мембранного апарата 21 для видалення продуктів реакції після обробки в НБ.

В процесі обробки НБ інтенсифікує перебіг хімічної реакції утворення селітри забезпечуючи повноту хімічної реакції. По завершенні процесу обробки конденсат подається в мембранний апарат для видалення продуктів реакції – селітри разом з іншими залишками солей.

На базі цієї технологічної схеми було розроблено лабораторний стенд та проведені дослідження очищення конденсату.

Методи досліджень. Експериментальне дослідження перебігу процесу очищення конденсату проводили з метою приведення його фізико-хімічних показників згідно нормативних вимог для використання в електролізерах.

На першій стадії експерименту досліджували процес вилучення домішок оксидів заліза з конденсату. Для цього задіяно ємність накопичувальну 6, електромагнітний фільтр 2 та циркуляційний насос 5.

Обробка конденсату тривала 10 хвилин після чого проводили відбір проб. В зразках визначали коефіцієнт очищення від домішок (ψ) з відбором проб на вході та на виході з установки залежно від параметрів фільтруючого шару (кульок) (L), напруженості магнітного поля (H), швидкості фільтрування (ν) і часу обробки (τ). Коефіцієнт очищення визначали за відносною зміною концентрації домішок оксидів заліза:

$$\psi = \frac{C_o - C}{C_o}$$

де C_o – концентрація домішок оксидів заліза на вході в установку; C – локальне значення концентрації домішок оксидів заліза, що відповідає певним значенням L, H, ν, ψ. Частку домішок оксидів заліза визначали шляхом циклічного фільтрування за методикою. Оцінювання показників видалення з конденсату металевих домішок здійснювали згідно ДСТУ 7262:2012 «Методи визначення домішок заліза»; оксиду азоту і діоксиду вуглецю згідно ДСТУ ГОСТ 8.532-2003.

На другій стадії експерименту досліджували очищення конденсату від оксидів азоту (NO_x). Для цього залучали в роботу установку НБ 1, пристрій подачі розчину аміаку 3, насос-дозатор 7 і мембранний пристрій. Для очищення конденсату від оксидів азоту в ємності 3 попередньо готували розчин води з аміаком в пропорції 0,25 кг аміаку на 100 л води для отримання солі амонію:

$$NH_3 + H_2O = NH_4OH$$

Для забезпечення повноти перебігу хімічної реакції компонентів використовували дослідну установку НБ, куди дозовано подавали підготовлений розчин. Для цього вмикали насос-дозатор 7, відкривали послідовно вентилі 15 і 14, вмикали НБ 1 і подавали конденсат на обробку протягом 10 хвилин. В результаті взаємодії нітратної (азотної) кислоти з розчином аміаку отримували аміачну селітру:

$$HNO_3 + NH_4OH = NH_4NO_3 + H_2O$$

Розчин аміачної селітри NH_4NO_3 в конденсаті проходив через мембранний пристрій 21. При цьому отримували насичену солями рідину, що не пройшла через мембранний пристрій і може бути утилізована для отримання добрива та очищений від надлишкових солей конденсат, який застосовується для подальшого використання. Після завершення обробки проводили відбір проб.

На третій стадії експерименту досліджували процес вилучення діоксиду вуглецю (CO_2) з конденсату без застосування електромагнітного фільтра в схемі. Для цього на установці задіяно НБ 1 і насос вакуумний 4. В ході експерименту спочатку перекривали вентиль трьох ходовий 8 і вентиль 13 та відкривали вентиль 14 вмикаючи також електропривод НБ 1 та насос вакуумний 4. Після завершення процесу обробки, який тривав 10 хвилин проводили відбір проб для подальшого дослідження.

При виконанні експериментальних досліджень застосовані стандартизовані вимоги ДНАОП 0.00-1.08-94, ДСТУ ГОСТ 18.532:2003, ДСТУ ISO 3696:2003, СОУ-Н МПЕ 40.1.20.509:2005 і ДБН В.2.5-77:2014. Визначення розмірів дисперсних домішок в дослідних зразках проводили за допомогою лазерного аналізатора розміру частинок LA950. Контроль водневого показника pH проводили при використанні багатофункціонального приладу COnDO EZODO PCT-407. Результати експериментальних досліджень обробляли методами

математичної статистики. Збіжність результатів експерименту становила 0,90. Статичну обробку експериментальних даних проводили з застосуванням методів регресивного аналізу з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.

Результати досліджень та їх обговорення.

Отримані результати експериментальних досліджень впливу довжини фільтруючого шару (L), напруженості зовнішнього магнітного поля (H), швидкості фільтрування (v) та часу очищення конденсату (τ) в фільтруючому шарі на величину коефіцієнта очищення конденсату (ψ) від металевих домішок, які представлено на рис. 3 *а-г*. Кожна точка на графіку відповідає щонайменше 5-10 локальним концентраціям металевих домішок до і після очищення конденсату. Початкова кількість домішок оксидів заліза в конденсаті становила 1,89 мг/кг. Вміст вуглекислого газу в конденсаті становив 30…70 мг, а оксидів азоту – 3,20 мг/кг.

Результати дослідження показали, що зміна довжини фільтруючого шару L в межах 0,090…0,45 м дозволила досягти максимального значення коефіцієнта $\psi = 0{,}45$ (рис. 3а). При зміні напруження магнітного поля H в межах 5…80 кА/м величина коефіцієнта ψ становила 0,42, а подальше збільшення H до 120 кА/м дозволило отримати $\psi = 0{,}45$ (рис. 3б).

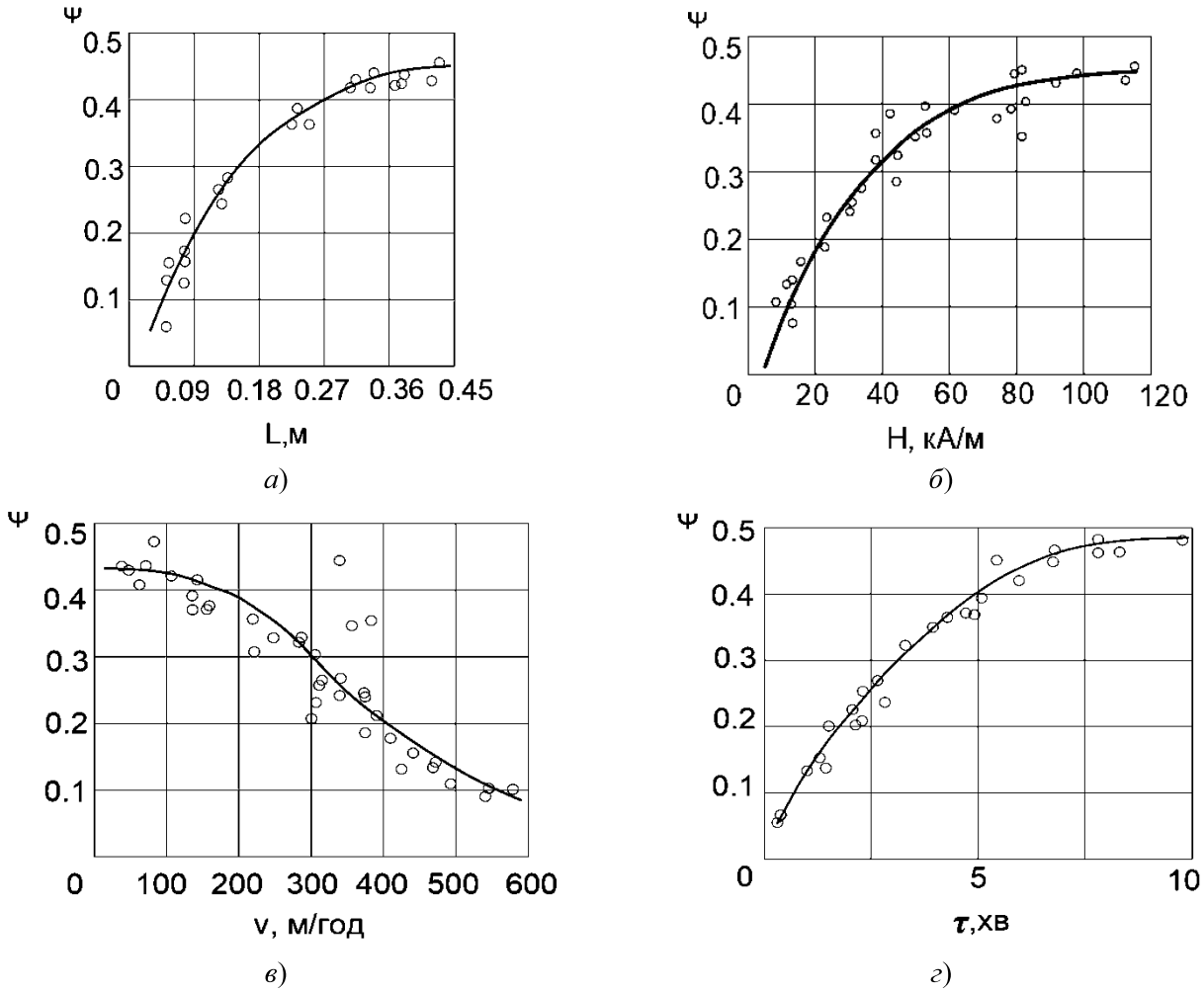


Рис. 3. Зміна коефіцієнта очищення конденсату (Ψ) від домішок оксидів заліза залежно від: а – впливу довжини фільтруючого шару (L); б – напруження магнітного поля (H); в – швидкості фільтрування (v); г – часу очищення (τ) на коефіцієнт очищення конденсату в електромагнітному фільтрі (Ψ)

Fig.3. Changes in the condensate purification factor (Ψ) from iron oxide impurities depending on: a – the effect of the length of the filter layer (L); b – magnetic field strength (N); c – filtering speed (v); d – purification time (τ) on the condensate purification factor in an electromagnetic filter (Ψ)

Дослідження впливу швидкості фільтрування (v) на коефіцієнт Ψ показало, що при збільшенні швидкості в межах 100…250 м/год величина коефіцієнта ψ знижувалась в межах 0,43…0,35. Подальше зростання швидкості в межах 250…500 м/год показало зниження показника 0,35…0,13. Збільшення швидкості v понад 250 м/год привело до переходу течії конденсату з ламінарного режиму в турбулентний, що погіршує процес очищення рідини від металевих домішок.

Таку закономірність можна пояснити забрудненням фільтруючого шару металевими домішками та зниженням швидкості проходження конденсату через створюваний гідравлічний опір фільтруючого шару.

Результати вивчення закономірності впливу часу обробки τ на величину коефіцієнта очищення Ψ показали, що для діапазону τ = 0…4 хвилини обробки величина коефіцієнта ψ зростала досить стрімко до 0,35. Подальше збільшення τ до 10 хвилин призвело до менш суттєвого зростання коефіцієнта ψ – до 0,48.

На рис. 4 представлено характер зміни концентрації домішок оксидів заліза С в конденсаті при значеннях H = 120 кА/м, v = 500 м/год, τ = 10 хв. Результати досліджень показали, що при значеннях L в межах 0,09…0,27 м концентрація домішок оксидів заліза становила 1,03 мг/кг, а при L 0,27…0,45 м – знизилась до 0,9 мг/кг, тобто в 2 рази.

Дослідження зміни концентрації оксидів азоту C_{NOx} від тривалості обробки представлено на рис. 5. Встановлено, що протягом 6 хвилин обробки концентрація NO_x знизилась з 3,50 до 1,75 мл/кг. При досягненні 10 хвилин обробки концентрація зменшилась до 0,72 мл/кг.

На рис. 6 наведена залежність зміни pH кислого конденсату від тривалості його обробки на дослідному зразку нейтралізатора безреагентного (НБ).

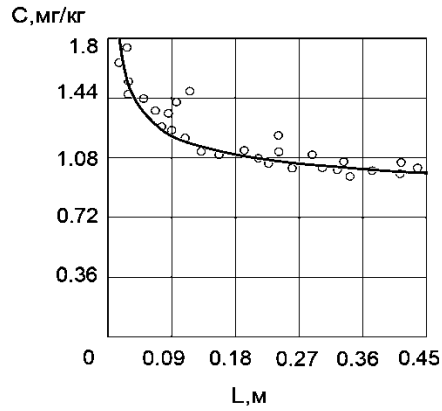


Рис. 4. Залежність концентрації домішок оксидів заліза в конденсаті від впливу фізичних величин H = 120 кА/м, v = 500 м/год, τ = 10 хв

Fig.4. Dependence of the concentration of iron oxide impurities in condensate on the influence of physical quantities H = 120 kA/m, v = 500 m/h, τ = 10 min

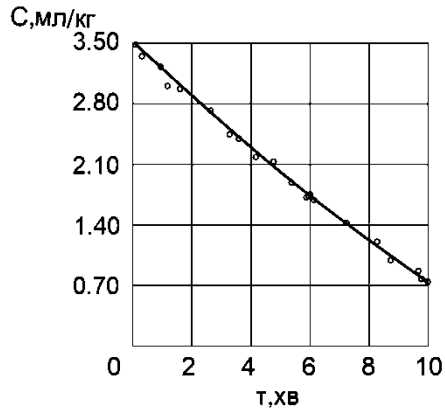


Рис. 5. Залежність зміни концентрації С оксиду азоту (NO_x) в конденсаті від тривалості обробки τ

Fig.5. Dependence of the change in the concentration of nitrogen oxide (NO_x) in the condensate on the treatment duration τ

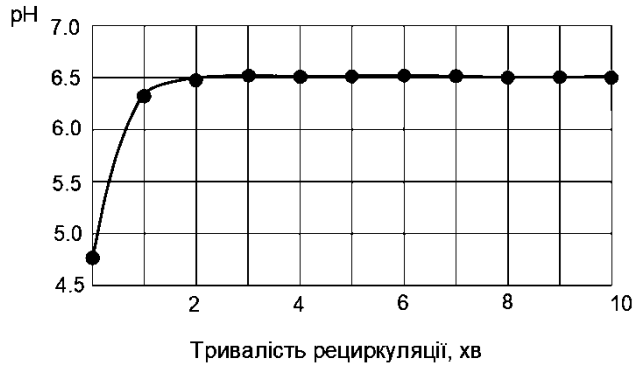


Рис.6. Залежність зміни pH кислого конденсату від тривалості його обробки в установці НБ
Fig.6. Dependence of the change in pH of acid condensate on the duration of its treatment in the non-reagent neutralizer installation

Отримане значення pH = 6,5 вже через 2 хвилини обробки вказує на те, що після обробки отримуємо очищений конденсат з низьким вмістом розчиненого вуглекислого газу, що за фізико-хімічними показниками близький до дистильованої води.

Висновки. В результаті проведених досліджень було розроблено та експериментально обґрунтовано ефективну технологію очищення кислого конденсату димових газів, що включає три ключові стадії: вилучення заліза, видалення оксидів азоту та декарбонізацію. Застосування електромагнітного фільтра показало високу ефективність вилучення оксидів заліза з конденсату при умовах оптимального поєднання параметрів фільтрації (коефіцієнта очищення ψ = 0,45). Етап очищення від оксидів азоту з використанням аміачного розчину у поєднанні з мембранним апаратом забезпечив зниження вмісту залишкових сполук NO_x до допустимих рівнів. Процес безреагентної декарбонізації, реалізований у вакуумному рециркуляційному контурі з роторно-пульсаційним апаратом, продемонстрував здатність вилучати до 98 % CO_2 без утворення сторонніх забруднюючи домішок.

Запропонована комплексна технологічна схема дозволяє довести хімічні показники очищеного конденсату до рівня, придатного для використання як живильної води у котлоагрегатах або у водневих електролізерах, що значно підвищує ефективність використання ресурсів та знижує екологічний вплив теплоенергетичних об’єктів. Зважаючи на зростаючу потребу у воді технічної якості в умовах обмежених ресурсів та пошкодженої інфраструктури, реалізація цієї технології є актуальною і перспективною для впровадження на енергетичних об’єктах України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Чернишов О.*: «В Україні розпочали роботу 99,7 % котелень» [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.naftogaz.com/news/v-ukraini-rozpochaly-robotu-99-7-kotelen-oleksiy-chernyshov Дата звернення 22.05.2025 р.

2. *Obodovych O., Tselen B., Nedbailo A., Ivanytskyi G., Radchenko N., Hozhenko L.* Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. Energy Technologies & Resource Saving. 2024. 81(4). P. 124-133. https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.10

3. *Підвищення ефективності* конденсаційних утилізаторів і поводження з конденсатом. Програма ЄБРР та GEF “Україна: сталі інновації у ланцюжках створення вартості в біоенергетиці” Режим доступу: https://saf.org.ua/news/1908/ Дата звернення 22.05.2025 р.

4. *Grégory Cano, Philippe Moulin.* Treatment of boiler condensate by ultrafiltration for reuse. Membranes. 2022. 12(12). P. 1285; https://doi.org/10.3390/membranes12121285

5. Тугай А.М., Орлов В.О. (2009). Водопостачання. Підручник, К., Знання. 735 с.

6. *Н.М. Толстопалова, М.І. Літинська, Т.І. Обушенко, І.М. Астрелін, О.В. Сангінова* (2020). Технологія та обладнання одержання питної та технічної води. Посібник Частина 2., К., КПІ ім. Ігоря Сікорського. 181 с. https://tnr.kpi.ua/images/Navch_Metod_Dokum/Tehnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf

7. *Схема електромагнітного* фільтра [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://studfile.net/preview/4520404/page:4/ Дата звернення 22.05.2025 р.

8. *Мембранні процеси* розділу [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://akvius.cv.ua/index.php/polezno-znat/23-membrannye-protsessy-razdeleniya Дата звернення 22.05.2025 р.

9. *Obodovych O.M., Tselen B. Ya, Sydorenko V.V., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L.* Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. Acta Periodica Technologica. 2022. 53, P.123-130 https://doi.org/10.2298/APT2253123O

10. *Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L.* Discrete-Pulsed Energy Input Based Method for Neutralisation of the Acidic Condensate. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25. P. 215–221. https://doi.org/10.54740/ros.2023.021

11. *V.A. Kishnevskiy, V.V. Chichenin, I.D. Shulyak.* Application of decarbonifiers in the flowsheets of water treatment. Праці одеського політехнічного університету. 2011. 2(36). С.120-124 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://old-pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1324890568.pdf Дата звернення 22.05.2025 р.

12. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Ivanitskiy G.K., Konyk A.V., Radchenko N.L., Hartvih A.P.* Using of the energy discrete-pulse input method for the condensate natural gas combustion products neutralizing. Scientific Works, Vol. 81(1). P.9-14 https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663

13. *S. Yarotskyi, B. Tselen* Using prospect method of discrete-pulse input of energy to neutralizing acidic aqueous solutions. Industrial Heat Engineering. 2015. Vol 37 (4): https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.03

14. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Hartvih A.P., Konyk A.V., Radchenko N.L., Shchepkin V.I.* The formation of acidic condensate during deep heat utilization from natural gas combustion products and the apparatus of its neutralizing Scientific Works. 2017. Volume 80(1). P.4-8 https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.191

TECHNOLOGIES FOR UTILIZATION OF ACIDIC CONDENSATE FROM FLUE GASES. PRE-TREATMENT, DECARBONIZATION AND SUBSEQUENT USE

Tselen B. Ya.[1], Radchenko N.L.[2], Ivanytskyi G.K.[3], Nedbailo A.E.[4], Shchepkin V.I.[5]

[1]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, leading researcher, orcid.org/0000-0001-5213-0219
[2]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, senior researcher, orcid.org/0000-0002-5315-1609
[3]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine, D.Sc., professor; Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, D.Sc., leading researcher, orcid.org/0000-0002-0486-2359
[4]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, senior researcher, orcid.org/0000-0002-8590-5823
[5]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, chief technologist, orcid.org/0009-0000-5717-4835

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.9

In recent years, Ukraine has actively modernized gas boiler equipment, particularly within programs aimed at increasing energy efficiency and reducing harmful emissions. Traditional boilers with an efficiency of up to 85 % are being replacing with modern condensing boilers with efficiencies of 95–98 %, along with advanced burners, automation, and safety systems. The acidic condensate of flue gases produced in modernized boilers is a relatively clean liquid, comparable in quality to distilled water but with a high content of carbon dioxide. However, many central and regional boiler houses, especially in smaller Ukrainian cities, still operate using outdated equipment due to limited investment and wartime destruction. For example, boiler systems in Mykolaiv, Kyiv, and Zhytomyr have been severely damaged by shelling, complicating their restoration and modernization.

According to the Ministry of Energy, as of autumn 2023, Ukraine required around 370 modular boiler houses to restore heating services, highlighting the importance of replacing outdated systems. Although natural gas is consider a relatively clean fuel, the condensate resulting from its combustion using outdated equipment may still contain pollutants, including carbon dioxide (CO_2), nitrogen oxides (NO_x), and iron oxides. CO_2 forms weak carbonic acid (H_2CO_3) in aqueous environments, lowering the condensate's *pH* to about 4. Nitrogen oxides form at combustion temperatures above 1200–1300 °C, primarily as nitric oxide (*NO*) and nitrogen dioxide (NO_2), while iron oxides appear due to corrosion of steel components in the equipment.

Modern systems reduce or eliminate these pollutants, but many heat and power facilities still need modernization. Therefore, the development of technology and equipment for condensate purification is essential. This study focuses on creating a comprehensive purification system to remove three main contaminants – carbon dioxide, nitrogen oxides, and iron-containing. This allows the water quality to approach that of distilled water, making it suitable for using as feedwater for boilers or in electrolysers.

The analyses shows that purified condensate can reused in boiler systems, for equipment rinsing, humidification, solution preparation, fire safety systems, and as a water source for hydrogen production through electrolysis. Efficient reuse of condensate increases overall energy efficiency and reduces environmental impact.

The study proposes a multi-stage treatment process: removal of iron oxides using an electromagnetic filter; decarbonization using a non-reagent neutralizer; and NO_x removal through ammonium nitrate formation followed by membrane separation. Experimental research on a lab-scale model confirmed the effectiveness of the proposed system. Statistical analysis and standard testing methods been applied to validate results which confirming that the treated condensate meets quality standards for reuse in electrolysis and boiler applications.

References 14, figures 6.

Key words: acid condensate, hydrodynamic cavitation, decarbonization, purification, pH, iron removal.

1. *Chernyshov O.*: «V Ukraini rozpochaly robotu 99,7 % kotelen». [99.7% of boiler houses in Ukraine have started operating] [Electronic resource]. Access mode: https://www.naftogaz.com/news/v-ukraini-rozpochaly-robotu-99-7-kotelen-oleksiy-chernyshov (in Ukr.)

2. *Obodovych O., Tselen B., Nedbailo A., Ivanytskyi G., Radchenko N., Hozhenko L.* Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. Energy Technologies & Resource Saving. 2024. 81(4). P. 124-133. https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.10

3. *Pidvyshchennia efektyvnosti* kondensatsiinykh utylizatoriv i povodzhennia z kondensatom. Prohrama YeBRR ta GEF "Ukraina: stali innovatsii u lantsiuzhkakh stvorennia vartosti v bioenerhetytsi" [Improving the efficiency of condensate heat recovery units and condensate management. EBRD and GEF Programme 'Ukraine: Sustainable Bioenergy Value Chain Innovations'] [Electronic resource]. Access mode: https://saf.org.ua/news/1908/ (in Ukr.)

4. *Grégory Cano, Philippe Moulin.* Treatment of boiler condensate by ultrafiltration for reuse. Membranes. 2022. 12(12). P. 1285; https://doi.org/10.3390/membranes12121285

5. *Tuhai A.M., Orlov V.O.* (2009). Vodopostachannia. [Water supplies] Pidruchnyk, K., Znannia. 735 s. (in Ukr.)

6. *N.M. Tolstopalova, M.I. Litynska, T.I. Obushenko, I.M. Astrelin, O.V. Sanhinova* (2020). Tekhnolohiia ta obladnannia oderzhannia pytnoi ta tekhnichnoi vody. [Technology and equipment for producing drinking and process water]. Posibnyk Chastyna 2., K., KPI im. Ihoria Sikorskoho. 181 s. https://tnr.kpi.ua/images/Navch_Metod_Dokum/Tehnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf (in Ukr.)

7. *Skhema elektromahnitnoho filtra* [Schematic of the electromagnetic filter]. [Electronic resource]. Access mode: https://studfile.net/preview/4520404/page:4/ (in Rus.)

8. *Membranni protsesy rozdilu* [Membrane separation processes] [Electronic resource]. Access mode: https://akvius.cv.ua/index.php/polezno-znat/23-membrannye-protsessy-razdeleniya (in Ukr.)

9. *Obodovych O.M., Tselen B. Ya, Sydorenko V.V., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L.* Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. Acta Periodica Technologica. 2022. 53, P.123-130 https://doi.org/10.2298/APT2253123O

10. *Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L.* Discrete-Pulsed Energy Input Based Method for Neutralisation of the Acidic Condensate. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25. P. 215–221. https://doi.org/10.54740/ros.2023.021

11. *V.A. Kishnevskiy, V.V. Chichenin, I.D. Shulyak.* Application of decarbonifiers in the flowsheets of water treatment. Pratsi odeskoho politekhnichnoho universytetu. 2011. 2(36). P.120-124 [Electronic resource]. Access mode https://old-pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1324890568.pdf

12. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Ivanitskiy G.K., Konyk A.V., Radchenko N.L., Hartvih A.P*. Using of the energy discrete-pulse input method for the condensate natural gas combustion products neutralizing. Scientific Works, Vol. 81(1). P.9-14 https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663

13. *S. Yarotskyi, B. Tselen* Using prospect method of discrete-pulse input of energy to neutralizing acidic aqueous solutions. Industrial Heat Engineering. 2015. Vol 37 (4). P.23-30 https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.03

14. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Hartvih A.P., Konyk A.V., Radchenko N.L., Shchepkin V.I.* The formation of acidic condensate during deep heat utilization from natural gas combustion products and the apparatus of its neutralizing Scientific Works. 2017. Volume 80(1). P.4-8 https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.191

Отримано 03.06.2025
Received 03.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025

УДК 628.47:575.1

ІНТЕГРАЦІЯ CHLORELLA VULGARIS В СИСТЕМУ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Домбровський О.Г.[1] , Тракслер І.С.[2], Деркач Є.А.[3], Бондар А.В.[4]

[1]ПрАТ «МХП Еко Енерджи», канд. екон. наук,директор, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua
[2]Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, канд. техн. наук, старший науковий співробітник , e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514
[3]ПрАТ «МХП Еко Енерджи», канд. біол. наук,керівник відділу, e-mail: y.derkach@mhp.com.ua
[4]ПрАТ «МХП Еко Енерджи», бакалавр.лаборант, e-mail: an.v.bondar@mhp.com.ua

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.10

У роботі досліджено ефективність використання мікроводорості Chlorella vulgaris як сировини для біометанізації. Проведено порівняння енергетичного потенціалу рідкої та висушеної біомаси, вирощеної у фотобіореакторі. Умови анаеробного зброджування в мезофільному режимі показали, що висушена біомаса забезпечує вищий вихід біогазу (620 л/кг СОР) порівняно з рідкою (430 л/кг СОР), з вмістом метану до 60%. Отримані результати підтверджують доцільність застосування Chlorella vulgaris у біоенергетиці як високопродуктивного та стабільного джерела органічної сировини.

This study evaluates the efficiency of Chlorella vulgaris biomass as a substrate for biomethane production. Liquid and dried biomass cultivated in a photobioreactor were compared under mesophilic anaerobic digestion conditions. Results showed that dried biomass yielded 620 L/kg VS of biogas, while liquid biomass produced 430 L/kg VS, with methane content reaching up to 60%. These findings highlight the potential of C. vulgaris as a productive and stable feedstock for bioenergy applications.

Бібл. 8, рис. 4.
Ключові слова: Chlorella vulgaris, мікроводорості, біометан, біогаз, анаеробне зброджування, фотобіореактор.

Актуальність. Сучасні екологічні виклики та зростаючий попит на чисту енергію вимагають розробки і впровадження енергоефективних технологій, а також пошуку альтернативних джерел палива. З метою виробництва біоенергії та біотрансформації органічних відходів, значного поширення набула технологія анаеробного зброджування – біохімічного процесу, під час якого органічна речовина розкладається з утворенням біогазу, основними складовими якого є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2). Зниження залежності від викопного палива та необхідність мінімізації викидів парникових газів роблять біометан одним із основних елементів сталого розвитку енергетичної галузі. Оскільки процес біометанізації є однією з найбільш ефективних технологій перетворення органічних відходів на чисту енергію, біомаса і біопаливо складають значну частину майбутнього ландшафту відновлюваних джерел енергії. В зв'язку з цим, в рамках реалізації плану REPowerEU, країнами Європейського Союзу поставлено за мету до 2030 року виробляти 35 млрд кубометрів біометану щорічно. Однак, для досягнення цього обсягу, виникає питання щодо забезпечення достатньою кількістю органічної сировини як відновлюваного ресурсу [1, 2, 3].

Одним із перспективних рішень є біометанізація мікроводоростей [4].

Завдяки високій продуктивності біомаси, здатності до інтенсивної фіксації CO_2 та відсутності конкуренції за сільськогосподарські угіддя, мікроводорості становлять значний інтерес і можуть стати ключовим компонентом у сфері відновлюваної енергетики [5, 6]. Їх інтеграція в систему біометанізації може сприяти не лише підвищенню виходу біометану, але й забезпечити ефективну утилізацію органічних відходів.

Крім того, виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування дозволяє уникнути енергоємних етапів, таких як сушіння та екстракція біомаси. Мікроводорості можуть бути також успішно інтегровані в процес біологічного очищення стічних вод і поєднувати в собі переваги видалення різноманітних хімічних сполук, виробництва енергії та утилізації CO_2 [7, 8].

Оцінка біохімічного метанового потенціалу мікроводоростей є важливим етапом у визначенні їхньої енергетичної цінності. Дослідження проводяться за допомогою спеціалізованих тестів, що імітують процес анаеробного зброджування. При цьому органічний субстрат у контрольованих умовах змішується з актив-

ним інокулятом. Вихід біометану обчислюється шляхом порівняння отриманих результатів із контрольними зразками, що містять лише інокулят [9, 10].

Таким чином, інтеграція мікроводоростей у процес біометанізації відкриває нові можливості для розвитку сталої енергетики, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та зменшення екологічного навантаження.

Мета роботи Оцінити ефективність культивації мікроводоростей *Chlorella vulgaris,* для біометанізації, порівнюючи різні типи біомаси – рідку та суху.

Методи дослідження. Для вирощування біомаси *Chlorella vulgaris* було використано трубчастий фотобіореактор компанії "Algoliner" (Germany) об'ємом 100 ± 3 л. Фотобіореактор оснащений світлодіодами трьох спектрів: червоного (660 нм), синього (450 нм) та білого (6500 К). Режим освітлення – 16:8 (год), потужність освітлення – 60%; щільність фотосинтетичного потоку фотонів становила 1020 мкмоль/м^2•с [11].

Вирощування *Chlorella vulgaris* проводилося протягом 21 доби. Для культивації використано поживне середовище Bold Basal Medium [12].

Впродовж культивування вимірювалися такі показники як температура, значення pH та кількість сухої речовини. Показники фіксувалися щоденно, в один і той же час, після чого відбиралася проба культури водоростей об'ємом 100 мл для визначення вмісту сухої речовини. Для вимірювання температури та pH використовували датчик pH/температури, який знаходиться на виході з сонячного колектора фотобіореактора (Hamilton EASYFERM PLUS PHI ARC 120). Їх значення підтримувались в діапазоні 6-7 та 25–28 °C, відповідно. Регуляція pH проводилась шляхом впорскування чистого CO_2 за вимогою із заданим значенням 7,5. Подача CO_2 відбувалася через компресор з клапаном (FESTO VEMD-L-6-14-20-D21-M5-1-R1-V4: макс. витрата 20 л/хв) у світловій фазі. Коли значення pH перевищувало встановлений поріг 7,5, система контролю автоматично активувала клапан для подачі CO_2 з барботажем (0,5 л/хв). Така система регуляції забезпечувала стабільне підтримання оптимальних умов для росту мікроводоростей.

Визначення вмісту сухої речовини проводили ваговим методом. Після центрифугування одержану біомасу висушували в аналізаторі вологи (Precisa XM10 SE) при 105 °C.

В умовах фотобіореактора було проведено культивування Chlorella vulgaris за сталих параметрів освітлення та температури. Одержано два типи біомаси:

- Рідка фракція – біомаса, отримана в процесі безперервного вирощування в фотобіореакторі за оптимальних умов для росту водоростей.
- Суха біомаса – біомаса, висушена після збирання з фотобіореактора для подальшого використання в процесі біометанізації.

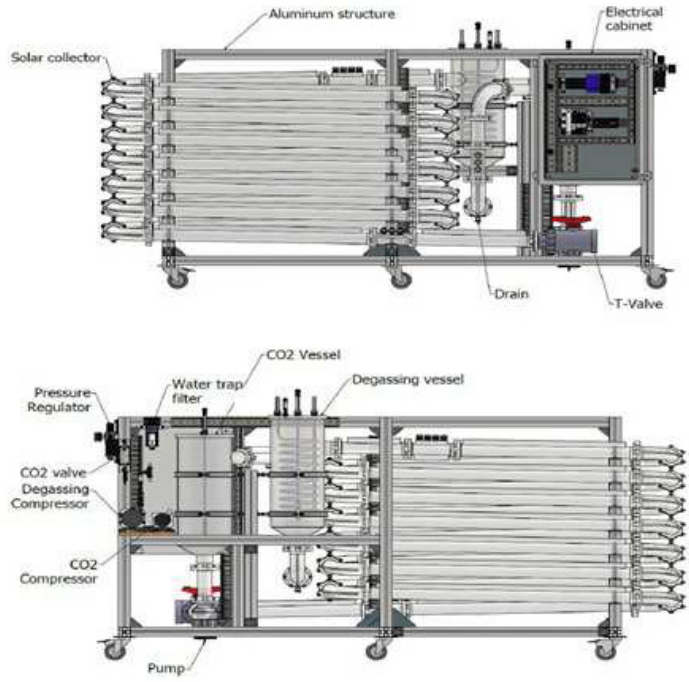


Рис.1 Конструкція фотобіореактора

Fig. 1 Photobioreactor design

Ріст культури в рідкому вигляді був стабільним при температурі 25°C та інтенсивності світла 200-300 мкмоль/м²•с. Після висушування біомаса зберігала свою високу питому енергетичну цінність, а її вологість при цьому знижувалась до 10-12%, що забезпечує довгострокове зберігання.

Для проведення біометанізації було використано батч-систему в мезофільному режимі (температура 37°C). Процес зброджування тривав 30 діб. Порівняння результатів показало:

- Рідка фракція демонструвала потенціал виробництва біогазу на рівні 430 л/кг•СОР, що є хорошим результатом, з огляду на відносно високий вміст води.
- Суха біомаса мала вищий потенціал біогазу – 620 л/кг•СОР, що вказує на підвищену ефективність зброджування після видалення води та, відповідно, підвищення концентрації органічної речовини.

Результати експерименту показують, що висушена біомаса *Chlorella vulgaris* має вищий потенціал для виробництва біогазу порівняно з рідкою фракцією. Це можна пояснити тим, що при висушуванні зменшується вміст води, що покращує співвідношення органічної речовини до води і сприяє більш ефективному зброджуванню. Крім того, висушена біомаса забезпечує менше втрат під час зберігання, що робить її більш зручною для подальшої обробки.

Chlorella vulgaris є високоякісним джерелом органічної біомаси, що має високу питому енергетичну цінність завдяки значному вмісту білка та ліпідів. Це робить її перспективною для використання в процесах біометанізації, де основною метою є перетворення органічної біомаси в біогаз. Зазначені мікроводорості мають здатність до швидкого росту, що забезпечує великі обсяги біомаси при невеликих витратах ресурсів.

Інтеграція біомаси Chlorella vulgaris у систему біометанізації може значно підвищити ефективність виробництва біогазу. Зважаючи на стабільну врожайність культури, її використання може стати важливим кроком у розвитку індустрії відновлювальних джерел енергії. Вдосконалення процесів культивації та збирання цієї біомаси може призвести до зниження собівартості біогазу, що робить цей процес більш доступним для широкого застосування в енергетичній галузі.

За результатами культивування побудовано графік, який представлено на рисунку 2.

Результати дослідження показали, що тип підготовки біомаси *Chlorella vulgaris* значною мірою впливає на продуктивність анаеробного зброджування:

- Рідка біомаса: 430 л/кг СОР біогазу.
- Суха біомаса: 620 л/кг СОР біогазу. (рис. 3).

Одним із ключових факторів, що обумовлює цю різницю, є значна концентрація органічної речовини у підготовленому субстраті. Рідка культура, попри свою технологічну зручність, містить значну кількість води, що розбавляє органічні компоненти й знижує щільність субстрату в реакторі.

Крім того, в рідкій формі біомаса має вищу доступність для гідролізу, однак швидке накопичення

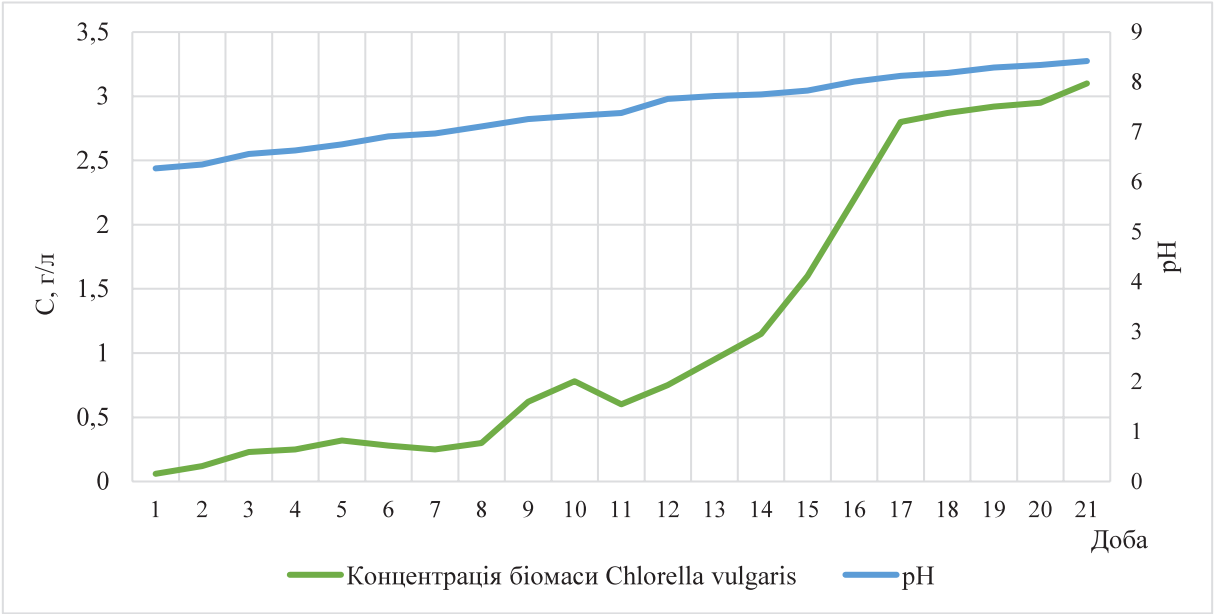


Рис. 2 Динаміка концентрації біомаси Chlorella vulgaris та pH протягом періоду культивування

Fig. 2 Dynamics of Chlorella vulgaris biomass concentration and pH during the cultivation period

летких жирних кислот, у свою чергу, може призводити до зниження величини pH, що потенційно пригнічує активність метаногенних мікроорганізмів. Це частково пояснює нижчий метановий вихід у разі використання рідкої суспензії. У висушеній біомасі відбувається стабілізація компонентів, що забезпечує рівномірніше навантаження на мікробіоценоз та знижує ризик кислотного шоку.

Аналіз складових частин біогазу показав, що метан становить основну частину біогазу – 55-60% за об'ємом, що є типовим для процесу біометанування органічної біомаси [13]. Важливо, що для висушеної біомаси цей показник був вищим (до 60%), що підтверджує її вищу ефективність у процесі зброджування.

Chlorella vulgaris містить високий відсоток білків (до 50%), ліпідів (до 20–25%) і помірну кількість вуглеводів. Білкові фракції при зброджуванні можуть спричиняти надмірне накопичення аміаку, який при високих концентраціях є інгібітором для метаногенів [14, 15]. Проте дослідження показало, що вихід мета-

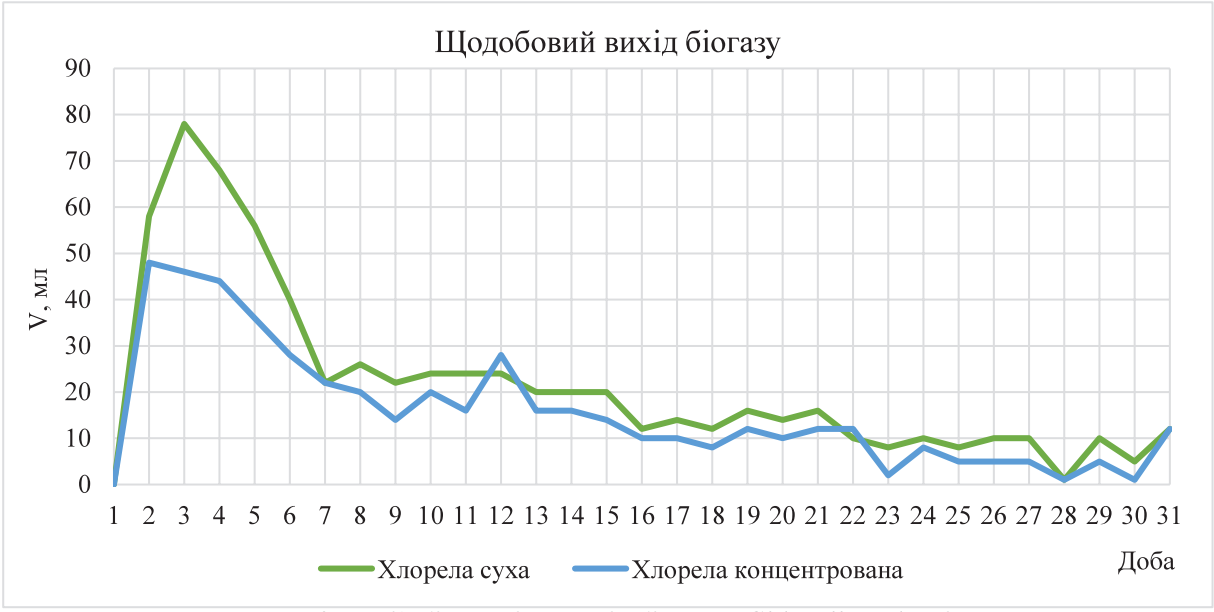


Рис. 3 Вихід біогазу із зразків біомаси Chlorella vulgaris

Fig. 3 Biogas yield from Chlorella vulgaris biomass samples

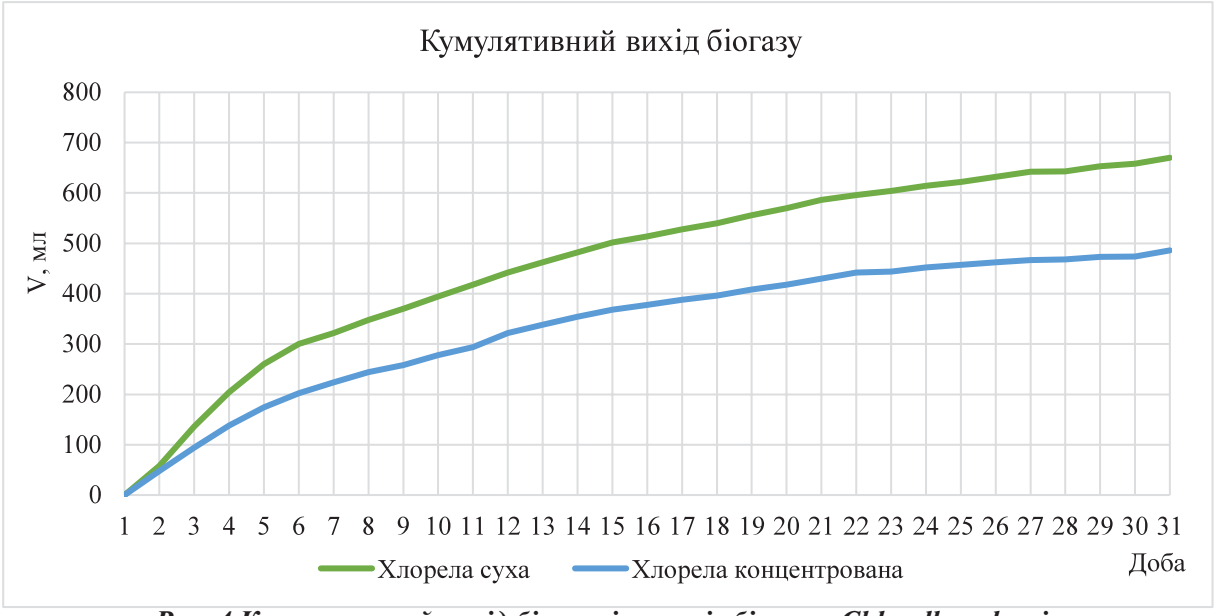


Рис. 4 Кумулятивний вихід біогазу із зразків біомаси Chlorella vulgaris

Fig. 4 Cumulative biogas yield from Chlorella vulgaris biomass samples

ну залишався в межах типової ефективності, що може свідчити про виражені буферні властивості середовища і відносно високий рівень адаптації мікробної консорції до високобілкового субстрату.

Також важливою є присутність в складі мікроводоростей каротиноїдів та хлорофілу, що проявляють виражений антиоксидантний ефект і позитивно впливають на мікробіологічну стабільність процесу. Ці сполуки можуть підтримувати активність гідролітичних бактерій на ранніх етапах ферментації, що в підсумку сприяє загальному підвищенню біогазового потенціалу.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в даному напрямку

Інтеграція мікроводоростей *Chlorella vulgaris* у процеси виробництва біометану демонструє високий потенціал як енергетично, так і екологічно ефективної стратегії. Мікроводорості здатні до активного фотосинтезу та утилізації CO_2, тому їх культивація може бути синергічно поєднана з поглинанням викидів CO_2 з ТЕЦ, біогазових станцій та інших промислових об'єктів.

У разі поєднання з системами очищення стічних вод, *Chlorella vulgaris* може поглинати надлишковий нітроген і фосфор, тим самим покращуючи якість води та зменшуючи навантаження на очисні споруди.

При цьому залишок дигестату може бути використано в якості цінного органічного добрива, що збагачене мікроелементами та залишками біомаси водоростей. В свою чергу, це створює можливості для замкненої циркуляції елементів у біотехнічній системі через етап енергетичної генерації.

На основі одержаних даних перспективними є такі напрямки досліджень:

- Термохімічна передобробка біомаси, зокрема гідроліз або парова обробка, може покращити біодоступність структурних компонентів клітинної стінки водоростей, що позитивно вплине на ефективність зброджування.
- Мікробна адаптація: попереднє пристосування інокуляту до високобілкової біомаси мікроводоростей може підвищити толерантність до NH_4^+ та збільшити вихід біогазу.
- Доцільно порівняти *Chlorella vulgaris* з іншими видами мікроводоростей (*Scenedesmus spp., Spirulina platensis, Nannochloropsis*) для виявлення видів з найвищим біоенергетичним потенціалом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *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(40, 91-100. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.10

2. *Біоенергетична асоціація* України. (2024). Прогноз розвитку біогазового сектору до 2035 року. Retrieved from https://uabio.org/materials/15681/

3. *Гелетуха Г., Желєзна 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/ttpe.2.2023.9

4. *Гелетуха 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/ttpe.4.2024.7

5. *Hasan, M. M., Mofijur, M., Uddin, M. N., Kabir, Z., Badruddin, I. A., & Khan, T. M. Y.* (2024). Insights into anaerobic digestion of microalgal biomass for enhanced energy recovery. Frontiers in Energy Research, 12. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1355686

6. *Siddiki, S.Y.A., Mofijur, M., Kumar, P.S., Ahmed, S.F., Inayat, A., Kusumo* et al. (2021). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. Fuel, 307, 121782. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121782

7. *L. Mendez, A. Mahdy, M. Ballesteros, C. González-Fernández,* Chlorella vulgaris vs cyanobacterial biomasses: Comparison in terms of biomass productivity and biogas yield, Energy Conversion and Management, Volume 92, 2015, P. 137-142. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.050

8. *Olguín, E. J.* (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. Biotechnology Advances, 30(5), 1031–1046. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001

9. *Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Wibberg, D., Winkler, A., Kalinowski, J., Posten, C., & Kruse, O.* (2017). Highly efficient methane generation from untreated microalgae biomass. Biotechnology for Biofuels, 10(1). https://doi.org/10.1186/s13068-017-0871-4

10. *Mendez, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., & González-Fernández, C.* (2015b). Biomethane production using fresh and thermally pretreated Chlorella vulgaris biomass: A comparison of batch and semi-continuous feeding mode. Ecological Engineering, 84, 273–277. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.056

11. *Algoliner.* (2024, November 8). User Manual Algoliner PBR-100 Photobioreactor. Germany: Algoliner. 93 p.

12. *Algae, U. C. C. O.* (n.d.). Bold basal medium. UTEX Culture Collection of Algae. https://utex.org/products/bold-basal-medium?variant=30991127609434

13. *IEA Bioenergy.* State of Technology Review – Algae Bioenergy. Golden, CO, USA : IEA Bioenergy, 2017. 158 p.

14. *Grubišić, M., Peremin, I., Djedović, E., Šantek, B., & Šantek, M. I.* (2024). Cultivation of a Novel Strain of Chlorella vulgaris S2 under Phototrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic Conditions, and Effects on Biomass Growth and Composition. Fermentation, 10(6), 270. https://doi.org/10.3390/fermentation10060270

15. *Magdalena, J. A., Ballesteros, M., & González-Fernandez, C.* (2018). Efficient anaerobic digestion of microalgae biomass: proteins as a key macromolecule. Molecules, 23(5), 1098. https://doi.org/10.3390/molecules23051098

INTEGRATION OF CHLORELLA VULGARIS INTO PRODUCTION SYSTEMS: ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

Dombrovskiy O.H.[1], Traksler I.S.[2], Derkach Ye.A.[3], Bondar A.V.[4]

[1]MHP Eco Energy LLC, PhD in Economics, Director, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua
[2]Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, PhD in Engineering, SeniorResearcher, e-mail: traksler@ukr.net , ORCID: 0009-0006-6485-3514
[3]MHP Eco Energy LLC, PhD in Biology, Head of Department, e-mail: y.derkach@mhp.com.ua
[4]MHP Eco Energy LLC, Bachelor, Laboratory Technician, e-mail: an.v.bondar@mhp.com.ua

https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.10

Objective: This study aims to explore the potential of Chlorella vulgaris as an efficient substrate for biomethanation, focusing on both liquid and dry biomass types. The research addresses the critical need for sustainable bioenergy sources and highlights the role of microalgae in bioenergy systems due to their high productivity, ability to capture CO_2, and compatibility with various bioprocesses.

Tasks:

1. Cultivate *Chlorella vulgaris* in a photobioreactor under controlled environmental conditions to obtain liquid and dry biomass samples.

2. Conduct detailed analysis of the physical and chemical properties of liquid and dry biomass, including moisture content, organic matter composition, and energy potential.

3. Perform batch anaerobic digestion experiments in a mesophilic regime to evaluate biogas and methane production from both biomass types.

4. Compare and analyze the differences in biogas yields, methane content, and overall energy efficiency between the liquid and dry biomass.

5. Assess the broader implications of integrating Chlorella vulgaris into biomethanation systems in terms of environmental sustainability and resource efficiency.

Research Methods: The study employed a tubular photobioreactor (Algoliner PBR-100, Germany) for cultivating *Chlorella vulgaris.* Controlled parameters such as light intensity, temperature, and pH were maintained to ensure optimal growth conditions. Bold Basal Medium (BBM) was used as the cultivation medium. Biomass was harvested after a 21-day growth period and categorized into two types: liquid biomass (as-is) and dry biomass (dehydrated to a moisture content of 10-12%).

Batch anaerobic digestion tests were conducted at 37°C for 30 days, using a batch reactor system. Biogas production and methane content were measured daily, and cumulative biogas yields were calculated. Moisture content and volatile solids (VS) of the biomass were determined using standard gravimetric and biochemical methods.

Results:

1. Moisture content analysis revealed a significant difference between liquid and dry biomass, with the latter being more concentrated in organic matter.

2. Liquid biomass yielded approximately 430 L of biogas per kg of volatile solids, while dry biomass demonstrated a superior yield of 620 L per kg of volatile solids.

3. Methane content in the biogas from dry biomass was higher (up to 60%) compared to the liquid form (55-58%), underscoring the enhanced efficiency of the dry substrate.

4. The results highlight that *Chlorella vulgaris* biomass, especially in its dry form, is a viable and efficient substrate for biogas production.

Conclusion: The findings emphasize the potential of Chlorella vulgaris as a high-performance feedstock for biomethanation, capable of yielding substantial amounts of biogas and methane. The integration of microalgae into bioenergy systems offers multiple benefits, including the utilization of CO_2 emissions, waste valorization, and enhanced energy output. This study contributes to the broader adoption of algae-based bioenergy strategies and paves the way for further optimization of cultivation and digestion processes.

References 8, Figures: 4.

Key words: Chlorella vulgaris, microalgae, biomethane, biogas, anaerobic digestion, photobioreactor.

1. *Tracksler, I., & Potapova, M.* (2024). Review of green hydrogen transformation technologies for increasing biomethane production at existing plants in Ukraine and Europe. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 46(4), 91–100. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.10 (in ukr.)

2. *Bioenergy Association* of Ukraine. (2024). Forecast of the development of the biogas sector until 2035. Retrieved from https://uabio.org/materials/15681/ (in ukr.)

3. *Geletukha, G., Zheliezna, T., Kucheruk, P., & Drahniev, S.* (2023). Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 49(2), 77–86 https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9 (in ukr.)

4. *Geletukha, G., Hyvel, M., & Kucheruk, P.* (2024). Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 46(4), 60-73. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.7 (in ukr.)

5. *Hasan, M. M., Mofijur, M., Uddin, M. N., Kabir, Z., Badruddin, I. A., & Khan, T. M. Y.* (2024). Insights into anaerobic digestion of microalgal biomass for enhanced energy recovery. Frontiers in Energy Research, 12. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1355686

6. *Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Kumar, P. S., Ahmed, S. F., Inayat, A., Kusumo* et al. (2021). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. Fuel, 307, 121782. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121782

7. *L. Mendez, A. Mahdy, M. Ballesteros, C. González-Fernández,* Chlorella vulgaris vs cyanobacterial biomasses: Comparison in terms of biomass productivity and biogas yield, Energy Conversion and Management, Volume 92, 2015, P. 137-142. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.050

8. *Olguín, E. J.* (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. Biotechnology Advances, 30(5), 1031–1046. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001

9. *Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Wibberg, D., Winkler, A., Kalinowski, J., Posten, C., & Kruse, O.* (2017). Highly efficient methane generation from untreated microalgae biomass. Biotechnology for Biofuels, 10(1). https://doi.org/10.1186/s13068-017-0871-4

10. *Mendez, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., & González-Fernández, C.* (2015b). Biomethane production using fresh and thermally pretreated Chlorella vulgaris biomass: A comparison of batch and semi-continuous feeding mode. Ecological Engineering, 84, 273–277. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.056

11. *Algoliner.* (2024, November 8). User Manual Algoliner PBR-100 Photobioreactor. Germany: Algoliner. 93 p.

12. *Algae, U. C. C. O.* (n.d.). Bold basal medium. UTEX Culture Collection of Algae. https://utex.org/products/bold-basal-medium?variant=30991127609434

13. *IEA Bioenergy.* State of Technology Review – Algae Bioenergy. Golden, CO, USA : IEA Bioenergy, 2017. 158 p.

14. *Grubišić, M., Peremin, I., Djedović, E., Šantek, B., & Šantek, M. I.* (2024). Cultivation of a Novel Strain of Chlorella vulgaris S2 under Phototrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic Conditions, and Effects on Biomass Growth and Composition. Fermentation, 10(6), 270. https://doi.org/10.3390/fermentation10060270

15. *Magdalena, J. A., Ballesteros, M., & González-Fernandez, C.* (2018). Efficient anaerobic digestion of microalgae biomass: proteins as a key macromolecule. Molecules, 23(5), 1098. https://doi.org/10.3390/molecules23051098

Отримано 25.06.2025
Received 25.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025