

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

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

Том 46, № 4, 2024

Головний редактор – Снєжкін Ю.Ф.

Редакційна колегія:

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

Редакційна рада:

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

ЗМІСТ

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

Снєжкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В.

Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з
конвективним та комбінованим енергопідведенням5

Басок Б.І., Бєляєва Т.Г., Давиденко Д.Б.

Теплоперенесення в каналах теплообмінника,
призначеного для рекуперативної вентиляційної
системи приміщення15

**Ободович О.М., Хоменко В.О., Сидоренко В.В.,
Степанова О.Є.**

Дискретно-імпульсне введення енергії як підвищення
ефективності цукрового виробництва25

**Боровик Д.В., Євдокименко Ю.І., Фролов Г.А.,
Круковский П.Г., Складенко Д.І.**

Визначення теплофізичних характеристик
вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21
розрахунково-експериментальним методом33

**Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.,
Декуша Г.В.**

Кінетика сушіння крапель розчинів сироваткового
білку як структуроутворюючого компонента для
фруктово- і ягідно-білкових композицій42

Снєжкін Ю.Ф., Петров П.І.

Вибір раціонального режиму сушіння м'яса курятини
при його використанні в продуктах швидкого
приготування51

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Гелетука Г.Г., Гивель М.М., Кучерук П.П.

Можливості виробництва передового біометану з
мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових
установок. Частина 1.60

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Петрова Ж.О., Бадеха А.В.

Видалення аміаку зі стічних вод звалищ твердих
побутових відходів методом віддування74

Желєзна Т.А., Драгнєв С.В.

Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного
сектору82

Тракслер І.С., Потапова М.В.

Огляд технологій трансформації зеленого водню для
підвищення виробництва біометану на діючих заводах
України та Європи91

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

THERMOPHYSICS AND THERMAL POWER ENGINEERING

UKRAINIAN SCIENTIFIC JOURNAL

Published quarterly

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

Volume 46, № 4, 2024

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

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

Advisory Editorial Board:

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

CONTENTS

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

Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V.

Intensive drying methods for apple slices with convection
and combined energy supply5

Basok B.I., Beljaeva T.G., Davydenko D.B.

Heat transfer in the channels of the heat exchanger
intended for the recovery ventilation system of the room ..15

**Obodovych O.M., Khomenko V.O., Sydorenko V.V.,
Stepanova O.E.**

Discrete-pulse input of energy as increase in the efficiency
of sugar production25

**Borovyk D.V., Yevdokymenko Yu.I., Krukovsky P.G.,
Frolov G.O., Skliarenko D.I.**

Determination of thermophysical characteristics of
carbon-carbon materials by a computational-experimental
method33

**Turchyna T.Ya., Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A.,
Dekusha H.V.**

Drying kinetics of whey protein solutions as a structuring
component for fruit and berry-protein compositions42

Sniezhkin Yu.F., Petrov P.I.

Choice of a rational mode of drying chicken meat when
used in fast cooking products51

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

Geletukha G.G., Hyvel M.M., Kucheruk P.P.

Opportunities of advanced biomethane production from
microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1.60

**FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT
POWER UNITS, ECOLOGY**

Petrova Zh.O., Badekha A.V.

Removal of ammonia from solid waste landfill
wastewater by blowing74

Zheliezna T.A., Drahnev S.V.

Role of biofuels in transport sector decarbonization82

Traksler I.S., Potapova M.V.

Review of green hydrogen transformation technologies
for increasing biomethane production at existing plants in
Ukraine and Europe91

УДК 664.8.047

ІНТЕНСИВНІ СПОСОБИ СУШІННЯ ЯБЛУЧНИХ СЛАЙСІВ З КОНВЕКТИВНИМ ТА КОМБІНОВАНИМ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯМ

Снєжжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України, Пазюк В.М.², докт. техн. наук.,
Гусарова О.В.³, канд. техн. наук

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057
email: vadim_pazuk@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057
email: o.v.husarova@nas.gov.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7622-9168>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>

У статті досліджено процес сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості 5% за різних режимів та способів зневоднення. Запропоновано енергоефективний ступеневий режим конвективного сушіння 80/60 °C та ступеневий комбінований режим з поєднанням ІЧ-випромінювання та конвективного нагріву ІЧ (100 Вт)+60 °C/60 °C. Енергоефективність розроблених режимів підтверджується скороченням тривалості процесу в 1.9 рази порівняно зі стаціонарним режимом за температури сушильного агента 60 °C. Одержано залежність для визначення загальної тривалості процесу сушіння слайсів комбінованим способом.

The article investigates the process of drying apple slices to a low residual moisture content of 5% under different modes and methods of dehydration. An energy-efficient stepwise convective drying mode of 80/60 °C and a stepwise combined mode with a combination of IR radiation and convective heating of IR (100 W)+60 °C/60 °C are proposed. The energy efficiency of the developed modes is confirmed by a 1.9-fold reduction in the process duration compared to the steady-state mode at a drying agent temperature of 60 °C. The dependence for determining the total duration of the slices drying process by the combined method was obtained.

Бібл. 15, рис. 9.

Ключові слова: яблучні слайси, конвективне сушіння, конвективно-інфрачервоне енергопідведення, ступеневі режими, комбіновані режими, енергоефективність.

τ – час, хв;

θ – температура, °C;

χ_i – відносні коефіцієнти сушіння;

B – відновлюваність зразка, %;

d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря;

E – інтенсивність інфрачервоного випромінювання, кВт/м²;

K_i – емпіричні коефіцієнти сушіння;

K_n – коефіцієнт набухання;

N – максимальна швидкість сушіння, %/хв;

V – швидкість руху сушильного агента, м/с;

W – відносна вологість сировини, %;

Rb – число (критерій) Ребіндера.

Індекси:

$_k$ – кінцевий;

$_{кр}$ – критичний;

$_z$ – загальний;

$_i$ – порядковий номер.

Вступ

Сушіння це масообмінний процес видалення води з матеріалу шляхом випаровування, завдяки якому досягається збільшення терміну зберігання сировини із зниженням транспортної ваги [1]. Яблука – поширений вид фруктів, який майже цілорічно присутній в нашому раціоні харчування. У їхньому складі міститься значна кількість вітамінів (С, В1, В2, Р, Е), марганець, калій, а також легкозасвоюване залізо. Хімічний склад яблук представлено на рис. 1.

Хімічний склад яблук залежить від помологічного сорту, умов та місця вирощування, ступеня зрілості, періоду збирання та зберігання. Особливістю хімічного складу яблук є те, що в складі розчинних вуглеводів, перш за все цукрів, найбільша частина представлена фруктозою, а сахарози досить мало.

Також їх гіпоалергенні властивості дозволяють вживати яблука майже всім, в тому числі й діабетикам [2].

Для сушіння рекомендується використовувати яблука пізніх сортів дозрівання середнього ступеня зрілості

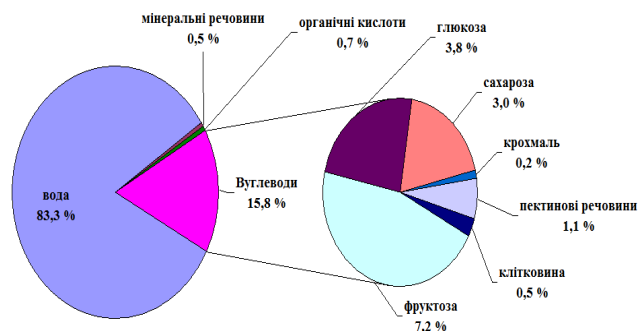


Рис. 1. Хімічний склад яблука (у % до загальної маси)

з великою кількістю ароматичних і смакових речовин. Для зручного та швидкого сушіння яблук, з можливістю надання їм необхідної форми, їх попередньо ріжуть на кружечки, пластинки, дольки або кубики. Такі яблучні шматочки різноманітної форми часто називають слайсами (від англ. *slice*) – тонкий зріз, шар, шматочок.

Як було показано раніше [3] для сушіння ба-жано використовувати яблука діаметром більше 50 мм. Для виготовлення більш подрібненого матеріалу можуть бути використані дрібні яблука, однак переробка плодів діаметром менше 30...35 мм недоцільна через збільшення відходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для зневоднення яблук використовують конвективний спосіб сушіння за низьких температур теплоносія, що є енерговитратним і довготривалим процесом. Тому для інтенсифікації процесу розроблені інші методи сушіння, зокрема сушіння інфрачервоним випромінюванням, струмами високої частоти, ультразвуком тощо.

Одним з ефективних методів сушіння для скорочення тривалості процесу сушіння є підведення теплоти через інфрачервоне випромінювання. Як показано авторами [4] збільшення інтенсивності інфрачервоного випромінювання від $E=0.130$ до 0.341 Вт/см² сприяє скороченню часу зневоднення яблучних скибочок від 280 до 190 хв, позитивно впливає на відновлюваність сушеного продукту.

Авторами [5] проведено дослідження інноваційного устаткування для сушіння слайсів із фруктів та овочів за умов ІЧ-випромінювання. Визначено вплив потужності ІЧ-випромінювання на кінетику процесу сушіння фруктових і овочевих слайсів. Проведено порівняння експериментальних даних щодо сушіння слайсів за умов НВЧ і ІЧ-випромінювання.

Вплив інфрачервоного опромінення досить значний в процесі сушіння й іншої сировини. Авторами [6] на основі експериментальних досліджень зневоднення

зернового матеріалу встановлено, що при збільшенні потужності ІЧ-джерела від 400 до 500 Вт час сушіння тривалість сушіння зменшується з 9 до 7 хвилин (сушіння проведено з початкової вологості матеріалу 11% до 8.75%).

Відомий спосіб сушіння, відповідно до якого зневоднення яблук проводили поєднанням попередньої ІЧ-обробки та конвективного сушіння. Короткочасну ІЧ-обробку проводили при інтенсивності інфрачервоного випромінювання $E=20$ кВт/м² здійснювали протягом 90 та 120 с. При тривалості процесу 90 с відбувається прогрівання внутрішніх шарів сировини до температури 70 °С, а при тривалості 120 с – до 82 °С. Попередньою ІЧ-обробкою протягом 90 с видалається до 15% вологи, а тривалість сушіння знижується на 23%, а при 120 с видалається до 25% вологи зі зменшенням тривалості процесу на 62% порівняно з лише конвективним способом сушіння за температури теплоносія 60 °С. Попередня ІЧ-обробка знижує вміст вітаміну С в яблуках до 95%, але за рахунок зменшення тривалості сушіння, вміст вітаміну С становить 65...70%, що перевищує вміст вітаміну С під час сушіння конвективним способом на 15...20% [7].

Застосування такого способу сушіння не доцільне, так як відбувається перевищення гранично допустимої температури матеріалу, яка є визначальним параметром під час сушіння рослинної термолабільної сировини.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є інтенсифікація сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості з мінімальними втратами біологічно-активних речовин.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити кінетичні закономірності сушіння яблучних слайсів конвективним та конвективно-інфрачервоним (комбінованим) способами;
- розробити інтенсивні режими зневоднення з використанням конвективного та комбінованого способу сушіння;
- розрахувати загальну тривалість процесу сушіння яблучних слайсів;
- оцінити відновлюваність та органолептичні показники сушеного продукту отриманого за різними методами сушіння.

Матеріали і методи досліджень

Дослідження процесу зневоднення яблук з метою вивчення основних закономірностей тепломасоперенесення проводили на експериментальному сушильному стенді.

Експериментальний стенд складається із системи ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу [8].

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.

Експериментальні дослідження сушіння яблук проводились в наступній послідовності:

1. Вибір сорту яблук.

Вибраний сорт яблук «Джонаголд» має червоний колір та збалансований солодкий смак (врожай 2023 року, зібраний у Вінницькій області, Україна).

2. Підготовка яблук до сушіння.

Яблука мили проточною водою і нарізали на пластинки завтовшки 4...5 мм, шириною 8...10 мм та довжиною 60...65 мм з видаленням насіннєвої камери.

3. Сушіння нарізаних яблучних слайсів в один шар до низької залишкової вологості 5% за різних режимів та способів зневоднення.

4. За експериментальними даними будували криві кінетики сушіння $W = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$, отримані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також температурні криві нагріву матеріалу $\theta = f(\tau)$.

5. З метою визначення якості отриманого продукту та перевірки правильності розроблених режимів зневоднення проведено дослідження по визначенню коефіцієнту набухання та відновлюваності за методикою, що наведена в публікаціях [9, 10].

Враховуючи, що збільшення тривалості сушіння негативно позначається на якості сушених продуктів із яблук, тому при розробленні режимів зневоднення контролювалась максимально допустима температура нагріву матеріалу та підвищення інтенсивності сушіння із скороченням три-валості процесу. Максимально допустима температура нагрівання яблук, як правило, не перевищує 60 °С.

Зневоднення яблучних слайсів проводили двома способами сушіння:

- конвективним – із застосування стаціонарних (60, 80 °С) та ступеневого (80/60 °С) режимів;

- комбінованим ступеневим інфрачервоно-конвективним режимом – ІЧ (100 Вт)+60 °С / 60 °С.

Ступеневе конвективне сушіння здійснювалось таким чином: на початку процесу температура теплоносія складала 80 °С, по мірі прогріву матеріалу до 55 °С, температуру теплоносія знижували до 60 °С, і підтримували на такому рівні до кінця процесу.

Ступеневе комбіноване інфрачервоно-конвективне сушіння складається з двох етапів: перший – комбіноване сушіння при ІЧ (100 Вт) + 60 °С, другий – конвективний при 60 °С. На першому етапі відбувається сушіння при поєднанні двох способів сушіння – ІЧ та конвективного, при досягненні матеріалом температури 59 °С – ІЧ-випромінювання вимикали і далі відбувалось лише конвективне зневоднення за температури 60 °С.

Результати та їх обговорення

1. Експериментальні дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів

1.1. Інтенсифікація процесу сушіння яблучних слайсів за рахунок ступеневого конвективного зневоднення

Визначення тривалості сушіння слайсів з яблук проводилось за температур теплоносія 60, 80, 80/60 °С (рис. 2) [11].

Збільшення температури теплоносія від 60 до 80 °С (криві 1, 2) зменшує тривалість сушіння 2.38 рази. Сушіння проводилось від початкової вологості 84% до кінцевої 5%. Як бачимо з кривої 2', за температури теплоносія 80 °С, кінцева температура нагрівання матеріалу досягла 68.2 °С, що вище допустимої в 60 °С, тому температуру теплоносія потрібно знижувати.

Запропоновано застосовувати ступеневий режим сушіння 80/60 °С. Такий режим дозволяє інтенсифікувати процес за рахунок застосування на першому етапі, тривалість якого складає 50 хв, температури сушіння 80 °С, яка забезпечує інтенсивне відведення більшої частини вологи з матеріалу (криві 3, 3'). Потім, при досягненні матеріалом поточної вологості 18% та його прогрівання до 55 °С, температуру теплоносія знижували до 60 °С і підтримували на такому рівні протягом всього другого етапу сушіння до завершення процесу.

У даному випадку, тривалість сушіння збільшується до 100 хв порівняно з режимом сушіння 80 °С (криві 2, 3), але кінцева температура нагрівання в середині матеріалу не перевищує 51.7 °С, що менше на 16.5 °С (крива 2', 3'), що гарантує дотримання граничної температури сировини.

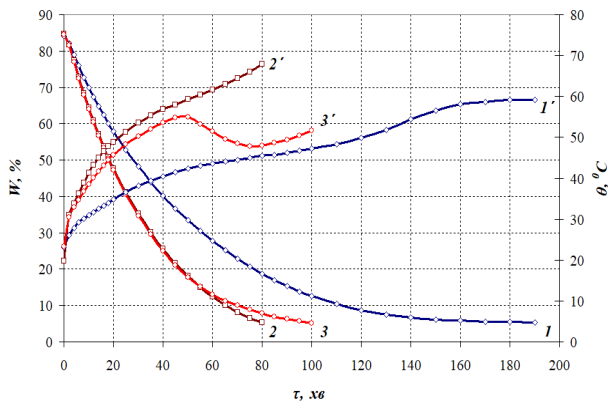


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на кінетику процесу сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм в один шар, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1, 1' – 60°C ; 2, 2' – 80°C ; 3, 3' – $80/60^\circ\text{C}$

Порівняно з стаціонарним режимом зневоднення 60°C (крива 1) спостерігається скорочення тривалості процесу на 90 хв.

Застосування ступеневого режиму $80/60^\circ\text{C}$ дозволяє отримати високу якість висушених яблук та інтенсифікувати процес сушіння.

Для характеристики процесу сушіння побудовані криві швидкості сушіння яблучних слайсів (рис. 3) [11].

Процес сушіння проходить в періоді падаючої швидкості сушіння.

Як видно з рис. 3, в режимах сушіння 80 та $80/60^\circ\text{C}$ (криві 2, 3) значення максимальної швидкості складають $2.3 \text{ \%}/\text{хв}$, що вище в 1.43 рази за режим сушіння 60°C (крива 1). Зменшення інтенсивності сушіння наприкінці процесу за ступеневого режиму $80/60^\circ\text{C}$ пов'язане із зниженням температури теплоносія до рівня максимально допустимої температури нагрівання сировини.

1.2. Інтенсифікація процесу сушіння яблучних слайсів ступеневим комбінованим інфрачервоно-конвективним способом (при ІЧ-випромінюванні $E = 3.8 \text{ кВт}/\text{м}^2$)

Як бачимо з рис. 4, застосування ступеневого комбінованого режиму сушіння ІЧ

(100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ порівняно з стаціонарним режимом 60°C (криві 1, 3) дозволяє зменшити тривалість процесу на 90 хв або в 1.9 рази [11]. Порівняння двох ступених, конвективного та комбінованого режимів (криві 2, 3) вказують, що тривалість сушіння однакова і складає 100 хв. Ці криві мають різний характер.

Температурні криві 1' – 3' описують характер протікання процесу сушіння яблучних слайсів (рис. 4).

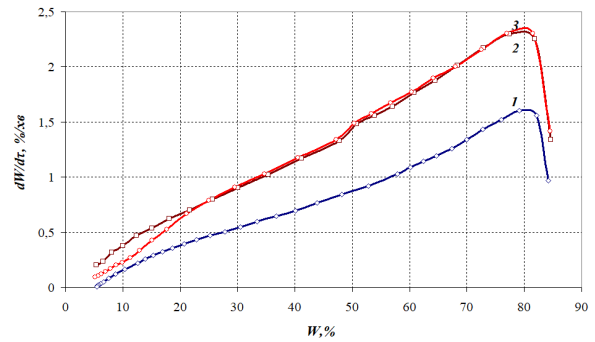


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1 – 60°C ; 2 – 80°C ; 3 – $80/60^\circ\text{C}$

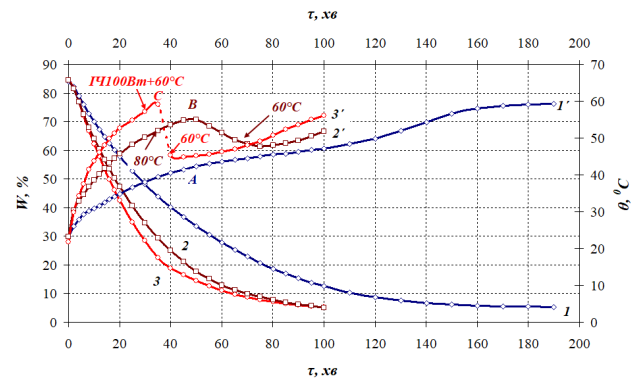


Рис. 4. Вплив режимів сушіння на кінетику процесу зневоднення яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1, 1' – 60°C ; 2, 2' – $80/60^\circ\text{C}$;
3, 3' – ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$
А, В, С – точки порівняння та зміни режимів сушіння

За температури теплоносія 60°C (крива 1') – процес сушіння йде повільно, з поступовим збільшенням температури матеріалу до 59.2°C та тривалим рівномірним видаленням вологи з нього.

Відмінність ступеневого комбінованого режиму сушіння ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ від ступеневого конвективного режиму сушіння $80/60^\circ\text{C}$ полягає в тому, що прогрівання настає швидше, вже на 35 хвилині, до температури матеріалу 59°C (крива 3', точка С). Кінцева температура нагрівання матеріалу в комбінованому режимі вища за конвективний і досягає 56°C .

Інтенсивність процесу сушіння яблучних слайсів на рис. 5 оцінюється за значенням максимальної швидкості сушіння [11].

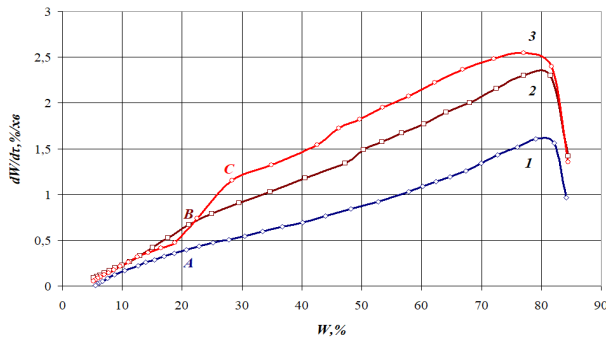


Рис. 5. Вплив режимів сушіння на швидкість зневоднення яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1 – 60°C ; 2 – $80/60^\circ\text{C}$; 3 – ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$

A, B, C – точки порівняння та зміни режимів сушіння

Так, комбінований режим сушіння ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ (крива 3) найбільш інтенсивний. Він дозволяє збільшити максимальну швидкість порівняно з режимом сушіння 60°C – в 1.58 рази, а з ступеневим режимом $80/60^\circ\text{C}$ – в 1.1 рази.

При застосуванні ступеневого комбінованого інфрачервоно-конвективного режиму (крива 3, рис. 5) спостерігається зниження швидкості сушіння при досягненні матеріалом вологості 23% (точка C), що пов'язане з вимкненням ІЧ-випромінювання та різким зниженням температури матеріалу. За рахунок цього обидва ступеневі режими мають однакову тривалість сушіння.

2. Дослідження тепломасообміну під час сушіння яблучних слайсів

2.1. Дослідження кінетики процесу зневоднення яблучних слайсів

Для дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів комбінованим інфрачервоно-конвективним способом представимо криву кінетики сушіння в напівлогарифмічних координатах $\lg W - (N \cdot \tau)$ на рис. 6 [12].

При математичному описі кінетики вологообміну під час сушіння в другому періоді повинні враховуватись емпіричні коефіцієнти (K_i), які обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти визначаються безпосередньо з досліду по сушінню.

Відносний коефіцієнт сушіння χ_i визначається лише формою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки.

Величини відносних коефіцієнтів сушіння яблучних пластинок в другому періоді визначаються за формулами (1 – 3) [11]:

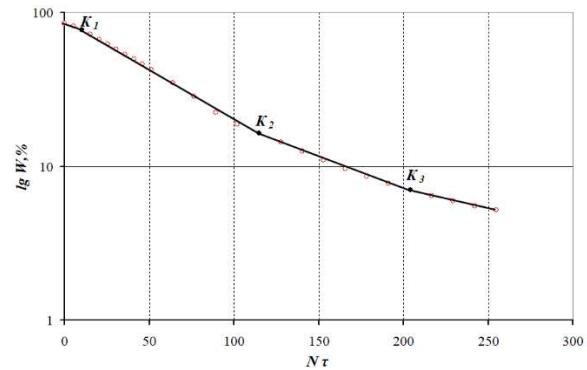


Рис. 6. Узагальнена крива кінетики сушіння яблучних пластинок розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, в координатах $\lg W - (N \cdot \tau)$

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K1} - \lg W_{K2}}{N \tau_1} = \frac{\lg 77 - \lg 16.49}{104.3}$$

$$\approx 0.0064 \quad (1)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K2} - \lg W_{K3}}{N \tau_2} = \frac{\lg 16.49 - \lg 7}{89}$$

$$\approx 0.0042 \quad (2)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K3} - \lg W_K}{N \tau_3} = \frac{\lg 7 - \lg 5.22}{50.8}$$

$$\approx 0.0024 \quad (3)$$

Коефіцієнти сушіння в другому періоді сушіння визначаються по залежностям (4 – 5):

$$K_1 = \chi_1 \cdot N = 0.0064 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0163 \text{ хв}^{-1} \quad (4)$$

$$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0.0042 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0107 \text{ хв}^{-1} \quad (5)$$

$$K_3 = \chi_3 \cdot N = 0.0024 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0061 \text{ хв}^{-1} \quad (6)$$

Загальна тривалість процесу визначається по залежності (7):

$$\tau_3 = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K1}}{W_{K2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K2}}{W_{K3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K3}}{W_K} \right) \quad (7)$$

Підставивши значення відносних коефіцієнтів сушіння χ_i та критичних вологостей W_{ki} отримуємо загальну тривалість процесу сушіння:

$$\tau_3 = \frac{1}{2.54} \left(\frac{1}{0.0064} \lg \frac{77}{16.69} + \frac{1}{0.0042} \lg \frac{16.69}{7} + \frac{1}{0.0024} \lg \frac{7}{5.22} \right) \approx 97 \text{ хв}$$

За експериментальними даними тривалість сушіння за комбінованого режиму становить 100 хв, тобто відхилення експериментального значення від теоретичного складає 3%.

2.2. Дослідження процесу тепломасообміну під час сушіння яблучних слайсів

Для опису процесу тепломасообміну під час сушіння застосовують число Ребіндера Rb . Число Ребіндера дорівнює відношенню витрат кількості теплоти на нагрівання матеріалу до кількості теплоти на випаровування з нього вологи за нескінченно малий проміжок часу [13]. Його ще називають критерієм оптимізації процесу сушіння.

Зміна числа Ребіндера для досліджуваних режимів сушіння зображена на рис. 7.

Аналіз зміни числа Rb від вологості матеріалу показує, що при режимі 60 °С (крива 1) до вологості матеріалу $W = 75\%$ відбувається прогрів сировини. У цей період більша частина теплоти витрачається на нагрів матеріалу, а не на випаровування вологи з нього. Далі крива 1 іде майже паралельно і дуже близько до лінії числа Rb з нульовим значенням. Це означає, що процес сушіння досить ефективний та більша частина теплоти витрачається на випаровування вологи, а не на прогрівання матеріалу. При вологості матеріалу

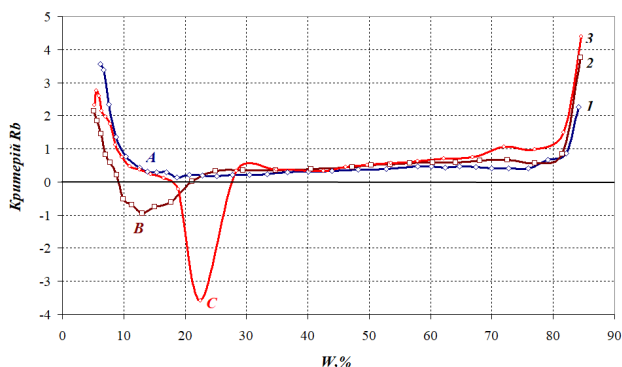


Рис. 7. Зміна числа Ребіндера під час сушіння яблучних слайсів розмірами 5×10×65 мм, $V = 1,5 \text{ м/с}$, $d = 10 \text{ г/кг с.п.}$: 1 – 60 °С; 2 – 80/60 °С; 3 – ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С
A, B, C – точки порівняння та зміна режиму сушіння

$W = 14\%$ (точка A), крива 1 починає різко зростати, що вказує на те, що все більше і більше теплоти витрачається на нагрівання матеріалу, ніж на випаровування вологи з нього. Це пов'язано з тим, що починається випаровування адсорбційно зв'язаної з матеріалом вологи, кількість якої не значна.

Число Rb для ступеневого режиму 80/60 °С (крива 2, рисунок 7) проходить ті ж періоди, що і при режимі 60 °С, але процес зневоднення більш інтенсивний, тому критичні точки інші. Так, прогрів закінчується приблизно при тій же вологості матеріалу (близько $W = 80\%$). Основне ефективне зневоднення матеріалу подібне до режиму 60 °С. Але при вологості матеріалу $W = 22\%$, коли відбувається перехід на режим 60 °С, точка B, значення числа Rb ще більше зменшується. Це закономірно, бо температура теплоносія знизилась, що вказує на більшу енергоефективність режиму. При вологості менше 10% число Rb починає зростати, що, як було зазначено вище, пов'язано з видаленням міцно зв'язаної з матеріалом адсорбційної вологи. Це також підтверджується характером температурної кривої 2' та кривої кінетики сушіння 2 на рисунку 4.

Залежність числа Rb при ступеновому комбінованому режимі ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С аналогічна попереднім режимам, але як видно з рисунку 7, крива 3, процес зневоднення найбільш ефективний. Прогрів матеріалу аналогічний режимам 60 °С та 80/60 °С та закінчується при вологості матеріалу близько $W = 80\%$. До досягнення матеріалом вологості $W = 30\%$ режим також подібний до вище описаного. Але при вологості $W \approx 30\ldots 35\%$, коли вимикається ІЧ-нагрів (крива 3, рисунок 4), спостерігається значно більше, ніж при режимі 80/60 °С, зменшення числа Rb (до мінус 3.8, точка C, крива 3, рисунок 7), що вказує на більш суттєву енергоефективність процесу зневоднення. Лише при вологості матеріалу близько $W = 10\%$, коли видалається адсорбційно зв'язана з матеріалом волога, витрата теплоти на нагрівання матеріалу різко збільшується.

Характер кривих $Rb = f(W)$ доводить доцільність та ефективність використання розроблених ступених режимів зневоднення 80/60 °С та комбінованого ІЧ 100 Вт) + 60 °С / 60 °С.

3. Дослідження якісних характеристик яблучних слайсів

Властивість до набухання – один із критеріїв якості сушеної продукції.

Перед розрахунком відновлюваності визначали коефіцієнт набухання (K_n), який показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає

здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу під час зневоднення. Динаміку зміни коефіцієнта набухання K_n від режиму сушіння представлено на рис. 8 [11].

Використання ступеневих режимів збільшують коефіцієнт набухання до 4.2...4.22, тобто зберігається здатність до відновлення властивостей після сушіння.

Відповідно до [14] відновлюваність матеріалу є більш показовою величиною, яка безпосередньо показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближається до вихідної, яка приймається за 100%.

Найбільше значення відновлюваності спостерігається для ступеневих режимів сушіння і складає 78...80% (рис. 9) [11].

Органолептичні показники висушених слайсів, одержаних за режимом зневоднення 80/60 °C та комбінованим ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C, були наступними: збалансований смак, природній аромат та світло-кремовий колір притаманний вихідній сировині.

Яблучні слайси одержані за стаціонарного режиму 60 °C мали менш виражений аромат свіжих яблук та набули жовтуватого забарвлення. Це пояснюється тривалим процесом зневоднення, що призводить до реакцій ферментативного потемніння зразків та руйнування деяких біологічно-активних речовин наявних у вихідній сировині.

Висновки

Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що температура теплоносія 80 °C забезпечує незначну тривалість процесу зневоднення, але органолептичні показники готового продукту незадовільні.

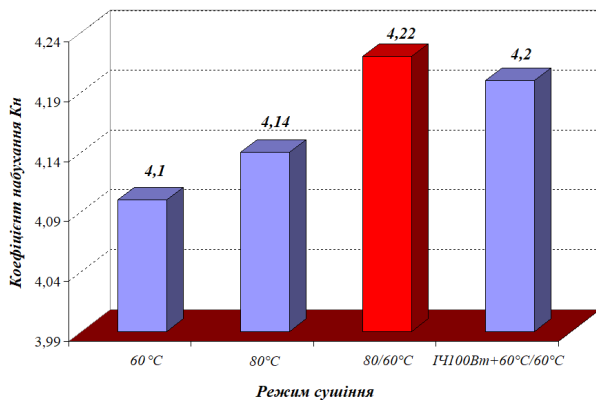


Рис. 8. Динаміка зміни коефіцієнту набухання K_n висушених яблучних слайсів розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.

Сушіння за температури 60 °C призводить до збільшення часу зневоднення, і як наслідок, до збільшення енерговитрат та погіршення органолептичних характеристик та відновлюваності.

Рекомендовано процес зневоднення слайсів проводити за розробленими ступеневими режимами сушіння: конвективного 80/60 °C та комбінованого інфрачервоно-конвективного ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C.

На підставі досліджень кінетики вологообміну при комбінованому конвективно-інфрачервоному режимі сушіння яблучних слайсів отримано формулу для розрахунку загальної тривалості процесу. Розбіжність між експериментальним та теоретичним значеннями тривалості сушіння не перевищує 3%.

Аналіз побудованих залежностей числа Ребіндера підтверджує енергоефективність рекомендованих режимів сушіння яблучних слайсів.

Одержаний продукт при розроблених ступеневих режимах сушіння має високу відновлюваність (78...80%) та органолептичні показники: збалансований смак, природній аромат та світло-кремовий колір притаманний вихідній сировині.

Повного відновлення висушених яблучних слайсів не спостерігається, через те, що під час сушіння відбувається усадка матеріалу, деформація структури паренхімних тканин, стискання вільних міжклітинних просторів по яким всмоктується вода. Через тепловий вплив відбувається необоротна денатурація речовин, які у нормальному стані зв'язують воду та набухають [14, 15].

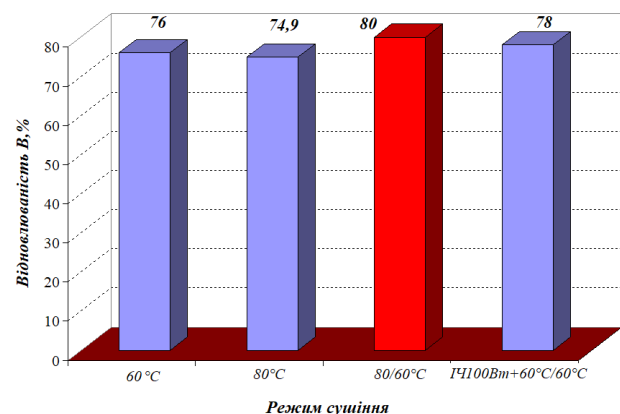


Рис. 9. Динаміка зміни відновлюваності B висушених яблучних пластинок з розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hany S. EL-Mesery, Ahmed I. EL-Seesy, Zicheng Hu, Yang Li. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 157. – 112070. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>.
2. Campeanu G., Neata G., Darjanschi G. Chemical Composition of the Fruits of Several Apple Cultivars Growth as Biological Crop // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. – 2009. – Vol. 37 (2). – P. 161 – 164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>.
3. Бессараб О.С., Шутюк В.В. Технологія сушіння плодів та овочів. Київ: НУХТ. – 2002. – 84с.
4. Hany S. El-Mesery, Kwami Ashiagbor, Zi-cheng Hu, W.G. Alshaer, A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 52. – 103676. ISSN 226. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.
5. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovy, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 5. – 11 (101). – p. 24 – 32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_5%2811%29_4
6. Bandura V., Kalinichenko, R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4. – Iss. 8 (94). – p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>.
7. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. - Київ: Сік Груп Україна, 2018. – 228 с.
8. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying // *INMATEH - Agricultural Engineering*. – 2018. – Vol. 56. – No 3. – p. 39–48.
9. Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Re-hydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices // *Journal of Chemistry*. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 453175. – p. 1 – 8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.
10. Гусарова О.В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук: дис...канд. техн. наук.: 05.14.06 // Київ: ІТТФ НАН України. – 2020. – 241 с.
11. Paziuk V., Husarova O., Bandura V., Fial-kovska L. Intensification of apple drying using convective and combined methods of dehydration // *INMATEH - Agricultural Engineering*. – Vol. 72, – No. 1. – 2024. – p. 173–182. <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-16>
12. Paziuk V.M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O.A., Polievoda Yu. Special aspects of soybean drying with high seedling vigor // *University Pjlstehnica of Buharest Scientific Bulletin. Series D*. – Vol. 83. – Iss. 2. – 2021. – p. 327–336.
13. Пазюк В.М., Гусарова О.В. Особливості сушіння яблучних слайсів при конвективному та конвективно-інфрачервоному енергопідведенні // Колективна монографія: Відповідальне виробництво та споживання: реалізація в нових поколіннях харчової продукції. – Riga: Publishing House “Baltija Publishing”, 2024. – p. 70–89. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-4>
14. Husarova O., Shapar R., Sorokova N. Intensification of heat and mass transfer during the convective drying of apple to low final moisture // *Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: collective monograph / edited by authors*. 4th ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2020. – pp. 191–211. ISBN: 978-9934-588-53-2. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2>
15. Гусарова О.В. Вплив видів бланшування яблук на процес зневоднення під час виробництва чипсів // *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. – 2018. – № 1 (27). – С. 147–156. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1306519>.

INTENSIVE DRYING METHODS FOR APPLE SLICES WITH CONVECTION AND COMBINED ENERGY SUPPLY

Sniezhkin Yu.F.¹, Paziuk V.M.², Husarova O.V.³

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*Doctor of Technical Sciences, Docent, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>, email: vadim_pazuk@ukr.net*

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1>

Drying is a mass-exchange process of removing moisture from a material by evaporation, which results in an increase in the shelf life of raw materials while reducing transport weight. Apples are a common type of fruit that is present in our diet almost all year round. They contain a significant amount of vitamins (C, B1, B2, P, E), manganese, potassium, and easily digestible iron. Apples are hypoallergenic and can be consumed by almost everyone.

The purpose of the work is to intensify the drying of apple slices to low residual moisture without loss of biologically active substances.

Research methods. The study of the kinetics of the slices 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 60, 80, 80/60 °C and a stepwise combined mode with a combination of IR radiation and convective heating of IR (100 W)+60 °C/60 °C, speed 1.5 m/s, moisture content 10 g/kg dry air.

Results and conclusions. Summarising the re-search results, it can be concluded that the temperature of the drying

agent at 80 °C ensures a short duration of the dehydration process, but the organoleptic characteristics of the finished product are unsatisfactory.

Drying at a temperature of 60 °C leads to an increase in dehydration time, and as a result, to an increase in energy consumption and a deterioration in organoleptic characteristics and recoverability.

It is recommended that the dehydration process of slices be carried out according to the developed stepwise drying modes: convective 80/60 °C and combined infrared-convective IR (100 W) + 60 °C / 60 °C.

Based on the study of the kinetics of moisture exchange in the combined convective-infrared mode of drying apple slices, a formula for calculating the total duration of the process was obtained. The difference between the experimental and theoretical values of the drying time does not exceed 3%.

The analysis of the constructed dependences of the Rebinder's number confirms the energy efficiency of the recommended modes of drying apple slices.

The resulting product under the developed stepwise drying regimes has high recoverability (78...80%) and organoleptic characteristics: balanced taste, natural aroma, and light cream colour inherent in the raw material.

References 15, figures 9.

Key words: apple slices, convective drying, convective-infrared energy supply, step modes, combined modes, energy efficiency.

1. Hany S. EL-Mesery, Ahmed I. EL-Seesy, Zi-cheng Hu, Yang Li. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 157. 112070. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>

2. Campeanu G., Neata G., Darjanschi G. Chemical Composition of the Fruits of Several Apple Cultivars Growth as Biological Crop // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2009. Vol. 37 (2). P. 161-164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>

3. Bessarab O.S, Shutiuk V.V. Tekhnolohiia su-shinnia plodiv ta ovochiv [Technology of drying fruits and vegetables]. Kyiv: NUKhT. 2002. 84 p. (in Ukr).

4. Hany S. El-Mesery, Kwami Ashiagbor, Zi-cheng Hu, W.G. Alshaer, A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 52. 103676. ISSN 226. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.

5. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovy, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 5. 11 (101). p. 24 – 32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_5%2811%29__4
6. Bandura V., Kalinichenko, R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 8 (94). p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
7. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. Teplomasoob-minni tekhnologii 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).
8. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying // INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. V. 56. No 3. p. 39–48
9. Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices // Journal of Chemistry. 2014. Vol. 2014. Article ID 453175. p. 1 – 8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.
10. Husarova O.V. Intensyfikatsiia teplomaso-perenosu pid chas oderzhannia chypsiv z yabluk: dys...kand. tekhn. nauk.: 05.14.06. [Intensification of heat and mass transfer during the production of apple chips: PhD thesis: 05.14.06] Kyiv: ITTF NAN Ukrainy. 2020. 241 c. (in Ukr).
11. Paziuk V., Husarova O., Bandura V., Fial-kovska L. Intensification of apple drying using convective and combined methods of dehydration // INMATEH - Agricultural Engineering. Vol. 72, No. 1. 2024. p. 173–182/ <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-16>
12. Paziuk V.M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O.A., Polievoda Yu. Special aspects of soybean drying with high seedling vigor // University Pjlstehnica of Buharest Scientific Bulletin. Series D. Vol. 83. Iss. 2. 2021. p. 327–336.
13. Paziuk V.M., Husarova O. V. Osoblyvosti sushinnia yabluchnykh slaisiv pry konvektyvnomu ta konvektyvno-infrachervonomu enerhopidvedenni [Features of drying apple slices with convective and convective-infrared energy supply] // Kolektyvna monohrafiia: Vidpovidalne vyrobny-tstvo ta spozhyvannia: realizatsiia v novykh pokolin-niakh kharchovoi produktsii. Riga: Publishing House “Baltija Publishing”, 2024. p. 70–89. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-4> (in Ukr).
14. Husarova O., Shapar R., Sorokova N. Intensification of heat and mass transfer during the convective drying of apple to low final moisture // Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: collective monograph / edited by authors. 4th ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2020. pp. 191–211. ISBN: 978-9934-588-53-2. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2>
15. Husarova O.V. Vplyv vydiv blanshuvannia yabluk na protses znevodnennia pid chas vyrobnytstva chypsiv [Influence of apple blanching types on the dehydration process during the production of chips] // Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vy-robnystv restorannoho hospodarstva i torhivli. 2018. № 1 (27). P. 147–156. <http://doi:10.5281/zenodo.1306519> (in Ukr).

Отримано 29.10.2024
Received 29.10.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 697.9:66.045

ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМІННИКА, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ РЕКУПЕРАТИВНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИМІЩЕННЯ

Басок Б.І., чл.-кор. НАН України, Беляєва Т.Г., ст. наук. співр, Давиденко Д.Б., аспірант

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.2>

Наведено результати чисельного моделювання теплообміну в каналах рекуперативного теплообмінника, призначеного для вентиляції приміщення. Теплообмінник представляє собою систему коаксіальних циліндричних каналів з мідними стінками. Результати відносяться до зимового періоду року. Ефективність роботи рекуперативної вентиляційної системи оцінюється по обсягу теплоти, переданої в теплообміннику від одного теплоносія до іншого, по витратах теплоносіїв та по температурі повітря, що видаляється з приміщення в довкілля, і температурі повітря, що надходить до приміщення після теплообмінника. Ці характеристики визначаються в залежності від кількості каналів (або теплообмінних поверхонь) та від перепадів тиску між вхідними та вихідними перетинами каналів.

The results of numerical modeling of heat transfer in the channels of a recuperative heat exchanger intended for room ventilation are given. The heat exchanger is a system of coaxial cylindrical channels with copper walls. The results refer to the winter period of the year. The efficiency of the recuperative ventilation system is evaluated by the amount of heat transferred in the heat exchanger from one heat carrier to another, by the consumption of heat carriers and by the temperature of the air removed from the room into the environment and the temperature of the air entering the room after the heat exchanger. These characteristics are determined depending on the number of channels (or heat transfer surfaces) and on the pressure differences between the inlet and outlet sections of the channels.

Бібл. 8, рис. 8.

Ключові слова: рекуператор, теплообмінник, повітрообмін, вентиляція, чисельне моделювання. C_p – питома теплоємність повітря; G – витрати повітря; n – зовнішня нормаль; p – тиск; Q – теплова потужність; r – радіальна координата; t – температура; v_r – радіальна швидкість; v_z – горизонтальна швидкість; z – поздовжня координата; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря; ρ – густина повітря.**Нижні індекси:** in – надходження; max – максимальний; out – видалення;

зов – зовнішній;

внут – внутрішній;

ст – стінка.

Вступ

Для підтримання нормальних санітарно-гігієнічних умов в приміщенні в ньому організовується повітрообмін відповідно до діючих ДСТУ. Системи повітрообміну або вентиляції забезпечують комфортні умови в приміщенні по температурі, вологості та вмісту кисню в повітрі, а також по допустимій концентрації шкідливих компонентів в повітряному середовищі приміщення (таких як, наприклад, вуглекислий газ, метан, радон чи чадний газ). Для правильної організації повітрообміну застосовують ряд критеріїв, одним з яких є кратність повітрообміну приміщення. Ця величина розраховується як відношення об'єму повітря, яке

надходить в приміщення і виводиться з приміщення за одну годину внаслідок роботи вентиляційної системи, до об'єму самого приміщення. Кратність вентиляції встановлюється окремо для приміщень різних типів і призначень. В загальному випадку її значення регламентується відповідними будівельними нормами та правилами, які визначають різні вимоги для різних будівель і приміщень та їх функціонального призначення.

Свіже вентиляційне повітря зазвичай надходить в приміщення з довкілля. В зимовий період року для підтримання належних температурних умов в приміщенні це повітря повинно підігріватися. Для

підвищення енергетичної ефективності системи повітрообміну частковий підігрів повітря з довкілля може здійснюватися шляхом застосування рекуперативних теплообмінників (РТО). РТО – це пристрій, який використовує теплоту повітря, що видаляється з приміщення, для підігріву повітря, що надходить в приміщення з довкілля. Це дозволяє скоротити енергоспоживання на підігрів зовнішнього повітря. В літній період року РТО дозволяє частково охолоджувати гаряче зовнішнє повітря, що надходить в приміщення внаслідок його вентиляції.

РТО розрізняються за принципом дії та конструкційними особливостями. Зазвичай цей пристрій має теплообмінні поверхні, які виконані з матеріалу, що має високу теплопровідність. Ці поверхні розділяють та відокремлюють потоки теплоносіїв та дозволяють здійснювати теплообмін між ними. Завдяки таким поверхням, повітря, що надходить з довкілля в зимовий період, нагрівається, а повітря, що видаляється з приміщення – охолоджується. Таким чином зменшується обсяг теплоти від нагрівача, що необхідна для підтримання нормальних температурних умов в приміщенні. Тобто, теплота, яка видаляється разом з повітрям, частково повертається в приміщення.

Розрахункові методи дослідження рекуперативних теплообмінників

Ефективність роботи РТО визначається за результатами розрахункових та експериментальних досліджень. Ця ефективність оцінюється за кількістю теплоти, що передається в теплообміннику від одного повітряного потоку до іншого та за температурними показниками повітряних потоків. На сьогоднішній день для розрахунку характеристик теплообмінників пропонуються різні методи [1, 2], більшість з яких – наближені. Найчастіше на поверхнях твердих елементів, що розділяють теплоносії, задаються граничні умови третього роду з відомими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі. Таку наближену розрахункову модель для визначення характеристик теплообмінника запропоновано в [3]. Модель передбачає застосування граничних умов третього роду на теплообмінних поверхнях та завдання для коефіцієнтів тепловіддачі. За цією моделлю визначається продуктивність теплообмінника та його теплові характеристики в стаціонарних умовах. Аналіз дозволяє провести детальне дослідження теплообмінника та оптимізувати розміри для будь-якого цільового застосування.

Наближене аналітичне розв'язання задачі про нестационарний температурний режим теплообмінника

з ребристими трубами та перехресним потоком теплоносіїв наведено в [4]. Аналітичне розв'язання задачі теплообміну у спрощеній постановці отримано для випадку ступінчастої зміни температури теплоносія на вході в теплообмінник. Аналітичне розв'язання нестационарної задачі перенесення теплоти в протиточному теплообміннику наведено також в [5]. Задача описується системою диференціальних рівнянь в частинних похідних. Її розв'язання одержується за допомогою перетворення Лапласа.

Результати чисельного моделювання роботи теплообмінника типу «труба в трубі», що застосовується в холодильній техніці, представлено в [6]. Процес нестационарного теплообміну описується системою одновимірних рівнянь динаміки течії та енергії. На поверхнях твердих елементів задаються величини коефіцієнтів тепловіддачі. Знайдені за результатами чисельного моделювання розподіли температури задовільно узгоджуються з експериментом. В [7] запропоновано наближений чисельний метод для розрахунків теплообміну в трубчастих теплообмінниках з поперечним потоком теплоносіїв. Визначається зміна температур обох теплоносіїв і температура стінки. Теплообмінник поділяється на контрольні об'єми, в яких температури рідини на виході розраховуються за замкнутими аналітичними виразами. Запропонований метод рекомендується використовувати для розрахунку теплообмінників зі складною проточною системою, в якій фізичні властивості рідин залежать від температури. Результати аналітичного та чисельного розв'язання рівнянь теплового балансу, що описують роботу теплообмінника типу «труба в трубі», наведено в [8]. Розглядаються випадки прямого і протиточного режимів роботи теплообмінників. Для обох випадків визначається його потужність. Результати аналітичного і чисельного розв'язання задачі задовільно узгоджуються.

З аналізу результатів розглянутих робіт випливає, що більшість з них розв'язуються у спрощеній постановці, яка передбачає застосування відомих виразів для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях теплообміну. Такий підхід може дати задовільні результати, коли температурні умови на поверхнях теплообміну аналогічні тим умовам, за яких визначалися ці коефіцієнти тепловіддачі. Але в загальному випадку таким умовам задовольнити практично неможливо. Тому більш точною буде спряжена постановка задачі теплообміну, яка передбачає наявність граничних умов четвертого роду на поверхнях контак-

ту теплоносія зі стінкою теплообмінника. Така постановка задачі застосовується в даному дослідженні температурного режиму рекуперативної вентиляційної системи.

Постановка задачі чисельного дослідження перенесення теплоти в теплообміннику

Для визначення впливу рекуперативної вентиляційної системи на температурний стан будівель спочатку розглядається спрощена геометрична схема теплообмінника, який представляє собою систему коаксіальних циліндричних поверхонь, виконаних з міді. Тобто даний теплообмінник це система кільцевих каналів типу «труба в трубі». Даний теплообмінний пристрій працює так, щоб маса повітря, що видаляється з приміщення, дорівнювала масі припливного повітря. Для цього відповідним чином підбираються діаметри циліндричних каналів та відстані між сусідніми каналами. Через центральний канал подається повітря, що видаляється з приміщення. Через наступний кільцевий канал подається припливне повітря. Тобто канали для припливного повітря і повітря, що видаляється, періодично чергуються. Каналів, через які повітря видаляється, на одиницю більше, ніж каналів для припливного повітря. Тому кількість кільцевих каналів і теплообмінних поверхонь – непарна. Це зроблено для забезпечення відповідності загальних витрат припливного повітря і повітря, що видаляється. Рух повітря в каналах забезпечується вентиляторами, які утворюють різницю тисків повітря у вхідних і вихідних перерізах каналів. Вважається, що перепади тисків в каналах для припливного і видаленого повітря – однакові за модулем, але різні за знаком. Це забезпечує рух двох потоків повітря в різні сторони і протиточний теплообмін між ними.

Рух повітряного середовища в кільцевих каналах теплообмінника описується системою рівнянь Нав'є-Стокса та енергії. Течія теплоносіїв - ламінарна. Середовище вважається нестисливим. Система рівнянь перенесення імпульсу та енергії записується в полярних координатах і має вигляд:

- рівняння нерозривності

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж осі 0Z

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r v_z)}{\partial r} + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \nu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(2 \nu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right); \quad (2)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж радіальної координати

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(v_r v_z)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2 r \nu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - 2 \nu \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right]; \quad (3)$$

- рівняння енергії

$$C_p \rho \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r t)}{\partial r} + \frac{\partial(v_z t)}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right); \quad (4)$$

де r - радіальна координата; z - поздовжня координата; v_r - радіальна швидкість; v_z - горизонтальна швидкість; p - тиск; t - температура; C_p - теплоємність повітря при постійному тиску; ρ - густина повітря; ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря; λ - коефіцієнт теплопровідності повітря.

До цієї системи задаються граничні умови. Вважається що для перерізу теплообмінника, що знаходиться на зовнішній поверхні стіни будинку, координата $z = 0$. При $z = 0$ для каналів, через які подається свіже повітря

з довкілля, відомою є температура $t=t_{\text{зов}}$ і надлишковий тиск $p=\Delta p$. Радіальна швидкість дорівнює нулю ($v_r=0$). Для каналів, через які повітря видаляється з приміщення ($z=z_{\text{max}}$), приймається $\frac{\partial t}{\partial z}=0$, $p=0$, $v_r=0$. Координата $z=z_{\text{max}}$ відповідає перерізу рекуператора, що знаходиться всередині приміщення. При $z=z_{\text{max}}$ для каналів, через які подається повітря з довкілля, приймається $\frac{\partial t}{\partial z}=0$, $p=0$. Для каналів, через які повітря виводиться з приміщення, приймається $t=t_{\text{внут}}$ і надлишковий тиск $p=\Delta p$. При цьому $v_r=0$.

Перенесення теплоти через стінки теплообмінника, що розділяє протилежно спрямовані потоки повітря, описується рівнянням теплопровідності

$$C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t}{\partial z} \right); \quad (5)$$

де $C_{\text{ст}}$ - теплоємність матеріалу стінки; $\rho_{\text{ст}}$ - густина матеріалу стінки; $\lambda_{\text{ст}}$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки.

На поверхні стінок каналу задаються умови четвертого роду

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{r=r_{\text{ст}+}} = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{r=r_{\text{ст}-}}; \quad t \Big|_{r=r_{\text{ст}+}} = t \Big|_{r=r_{\text{ст}-}}.$$

На осі симетрії $r=0$, а також на границі розрахункової області $r=r_{\text{max}}$, приймаються наступні граничні умови:

$$r=0: v_r=0; \frac{\partial T}{\partial r}=0; \frac{\partial v_z}{\partial r}=0;$$

$$r=r_{\text{max}}: v_r=0; \frac{\partial T}{\partial r}=0; \frac{\partial v_z}{\partial r}=0.$$

Система рівнянь (1) - (5) з наведеними граничними умовами розв'язується методом скінчених різниць.

Результати чисельного дослідження температурного режиму теплообмінника

За результатами розв'язання наведеної системи рівнянь з відповідними граничними умовами визначається залежність ефективності роботи цього теплообмінного пристрою в залежності від кількості

каналів, яка відповідає кількості теплообмінних поверхонь, і від значень перепадів тиску, що забезпечують рух теплоносіїв в каналах. При цьому вважається, що діаметр зовнішнього каналу теплообмінника – однаковий (150 мм) не залежно від кількості каналів і відстаней між ними. Довжина теплообмінника 475 мм.

Результати чисельного моделювання роботи теплообмінника – рекуператора у вигляді розподілів температури повітря в каналах для варіанту, коли перепад тиску дорівнює $\Delta p=0,36$ Па представлено на рис.1. Температура повітря, що видаляється, складає $T_{\text{внут}}=20$ °С, а температура зовнішнього припливного повітря $T_{\text{зов}}=-10$ °С. Повітря, що видаляється, надходить з правої сторони, а припливне повітря – з лівої сторони. Розглядаються випадки семи, дев'яти і одинадцяти каналів.

Розподіли поздовжньої швидкості і температури повітря вздовж радіусу теплообмінника на половині його довжини ($z=z_{\text{max}}/2$) представлені на рис. 2 та 3 відповідно. Результати одержані для випадків семи, дев'яти і одинадцяти каналів в теплообміннику при $\Delta p=0,36$ Па. З рис.2 видно, що абсолютні значення швидкостей повітря в каналах теплообмінника тим більші, чим менша кількість каналів в цьому теплообміннику. Так для випадку 7 каналів максимальні (за модулем) швидкості досягають значень 0,55 м/с...0,67 м/с. Для випадку 9 каналів максимуми швидкості зменшуються до 0,34 м/с ...0,4 м/с. У випадку 11 каналів максимуми швидкості стають ще меншими: 0,17 м/с ...0,26 м/с. Така залежність пояснюється тим, що збільшення кількості кільцевих каналів при постійному діаметрі теплообмінника призводить до зменшення ширини каналів, збільшенню поверхонь, що гальмують рух повітря, та збільшенню гідравлічного опору теплообмінника. При однакових значеннях перепаду тиску збільшення гідравлічного опору приводить до зменшення модулів максимальної швидкості і зменшенню витрати повітря, що проходить через теплообмінник.

З рис. 3 видно, що при збільшенні кількості каналів в теплообміннику на половині його довжини ($z=z_{\text{max}}/2$) зменшується різниця між температурами повітря, що видаляється з приміщення, та повітря, що надходить з довкілля. Так для випадку семи каналів температура повітря на середині теплообмінника, що видаляється з приміщення, становить $\sim +13$ °С, а температура повітря, що надходить з довкілля -3 °С ... -4 °С (крива 1 на рис.3). Тобто, повітря, що надходить з довкілля, нагрілося лише на $+6$... $+7$ °С, а повітря, що видаляється з приміщення, охолодилося також на $+7$ °С. У випадку

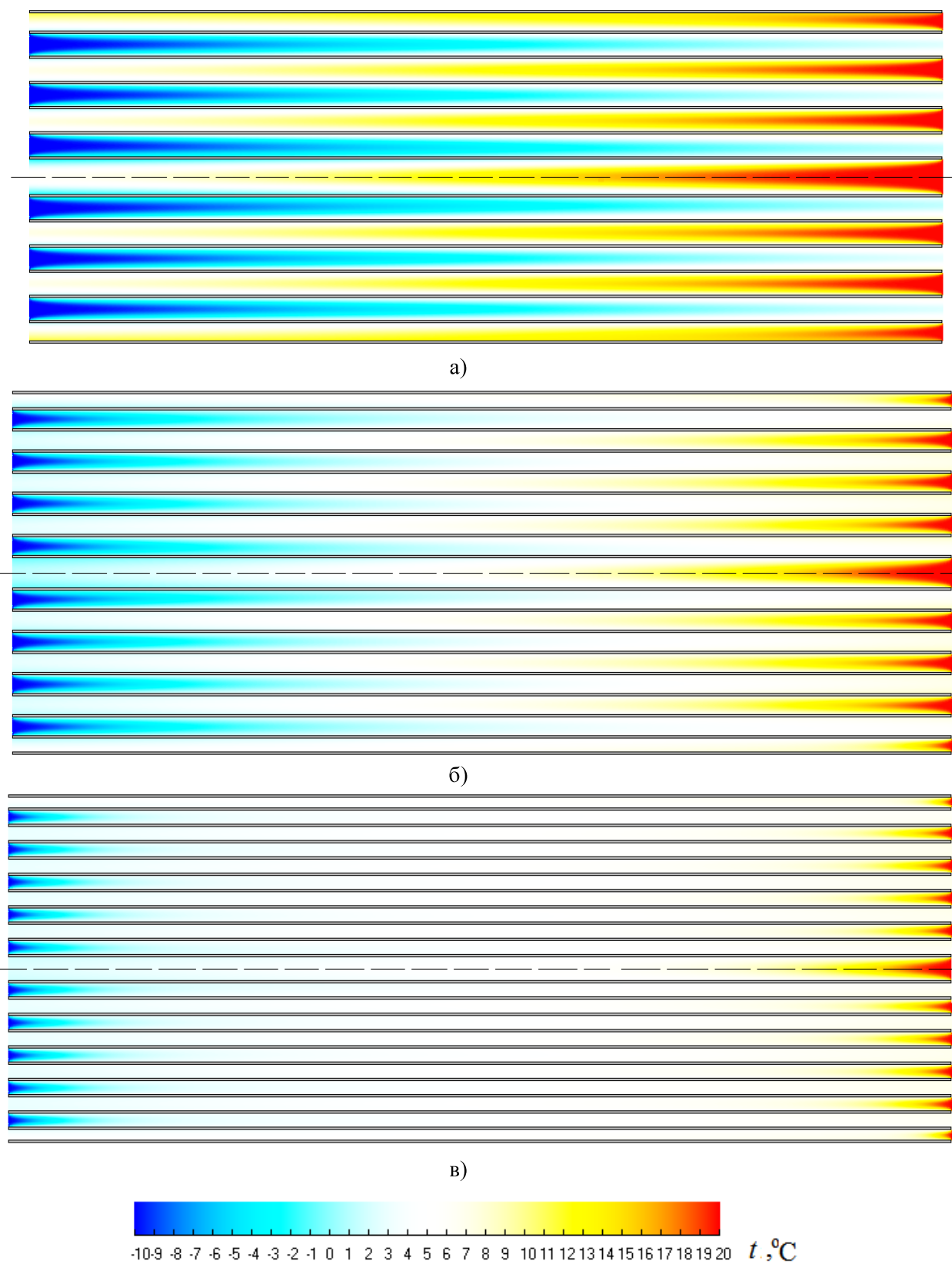


Рис. 1. Розподіли швидкості і температури в каналах рекуперативного теплообмінника при $\Delta p=0,36$ Па: а) - 7 каналів; б) - 9 каналів; в) - 11 каналів

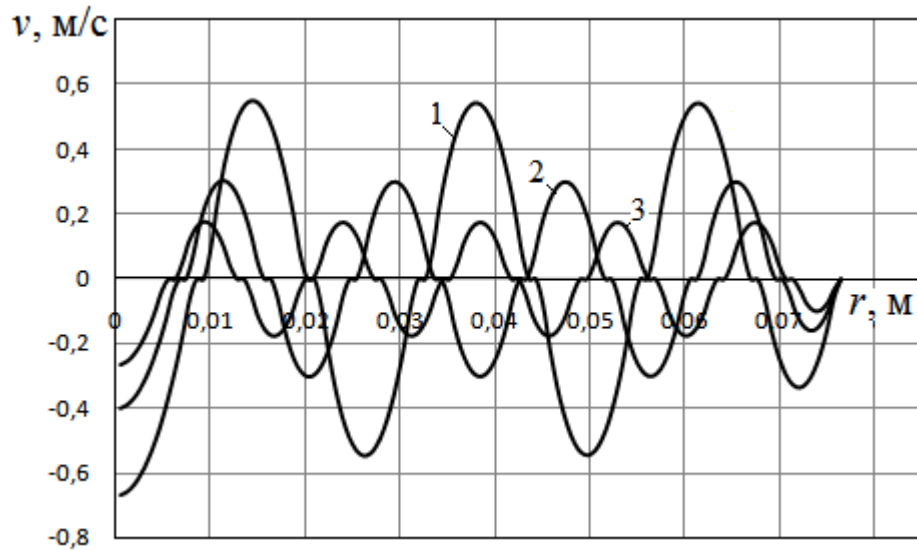


Рис. 2. Розподіл поздовжньої швидкості повітря вздовж радіусу теплообмінника при $\Delta p = 0,36$ Па: 1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

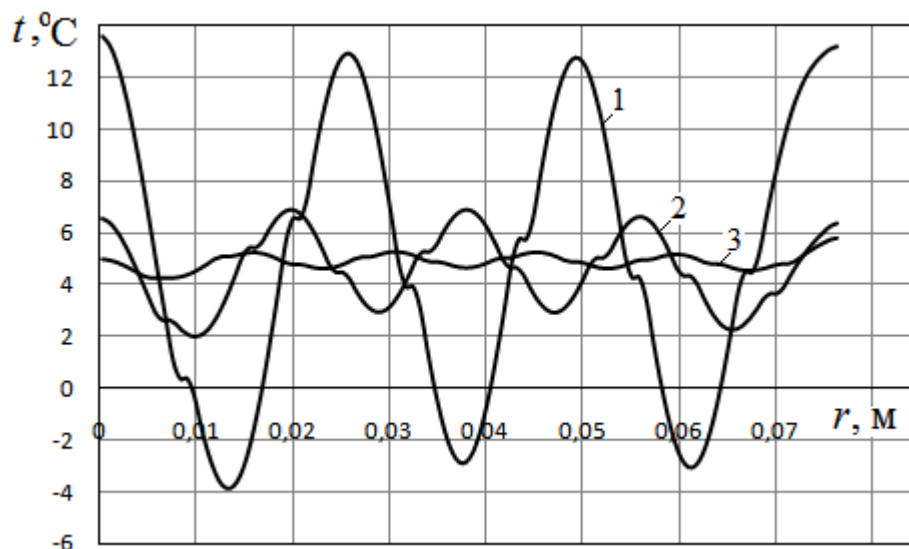


Рис. 3. Розподіл температури вздовж радіусу теплообмінника при $\Delta p = 0,36$ Па: 1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

дев'яти каналів температура повітря, що видаляється, в середній частині теплообмінника становить $\sim +6,5 \dots +7$ °C, а температура зовнішнього повітря, що підводиться, дорівнює $+2^\circ\text{C} \dots +3^\circ\text{C}$ (крива 2 на рис. 3). Тобто, повітря, що надходить з довкілля нагрілося на $12 \dots 13$ °C, а повітря, що видаляється з приміщення, охолодилося на 13 °C. Нагадаємо, що розміри каналів підбрані так, щоб витрати повітря, що надходить в приміщення, відповідали витратам повітря, що видаляється з приміщення.

У випадку одинадцяти каналів температура повітря, що видаляється з приміщення, становить

$+5,2^\circ\text{C}$, а температура повітря, що надходить з боку довкілля дорівнює $+4,5$ °C. З цих результатів видно, що чим більше каналів в теплообміннику, тим менше буде різниця між температурами обох теплоносіїв в середній частині каналу. Причина цього полягає у зменшенні витрат теплоносіїв при збільшенні кількості каналів. Збільшення кількості каналів призводить також до того, що теплообмін між двома протилежно спрямованими потоками повітря найбільш активно відбувається біля вхідного та вихідного перетинів каналів теплообмінника. В середній частині теплообмінника у випадку одинадцяти каналів теплообмін стає мало

інтенсивний через невисоку швидкість течії теплоносіїв та внаслідок відносно невеликої різниці між температурами теплоносіїв. З цього можна зробити висновок, що при великій кількості каналів в умовах, що розглядаються, можна зменшити довжину теплообмінника без суттєвого зменшення його ефективності.

До технічних характеристик, що визначають ефективність роботи рекуперативних теплообмінників, відносяться: теплова потужність, тобто кількість теплоти, що передана в теплообміннику від одного теплоносія до іншого за одиницю часу; витрати теплоносіїв; температура повітря, що видаляється з приміщення в довкілля після рекуператора; температура зовнішнього повітря, що надходить до приміщення після рекуператора. Ці характеристики визначаються

в залежності від кількості каналів (або теплообмінних поверхонь) та від перепадів тиску між вхідними та вихідними перетинами каналів. Результати, що отримані для випадків семи, дев'яти і одинадцяти каналів, представлені на рис.4-8.

З рисунків видно, що зі збільшенням тиску між вхідними і вихідними перерізами каналів збільшуються як витрати теплоносіїв, так і загальний обсяг переданої в теплообміннику теплоти. Зі збільшенням кількості каналів і зменшення відстані між каналами збільшується гідравлічний опір каналів теплообмінника. Внаслідок цього при однакових перепадах тиску загальні витрати теплоносіїв зі збільшенням кількості каналів зменшуються. При зменшенні витрат теплоносіїв зменшуються також загальні обсяги переданої в теплообміннику

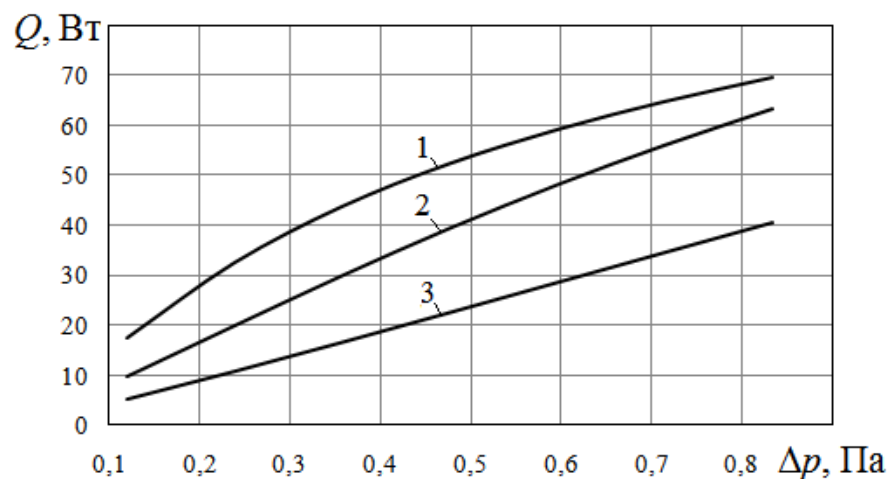


Рис. 4. Залежність кількості теплоти, що передається в рекуперативному теплообміннику, від перепаду тиску Δp між вхідними і вихідними перерізами каналів теплообмінника:
1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

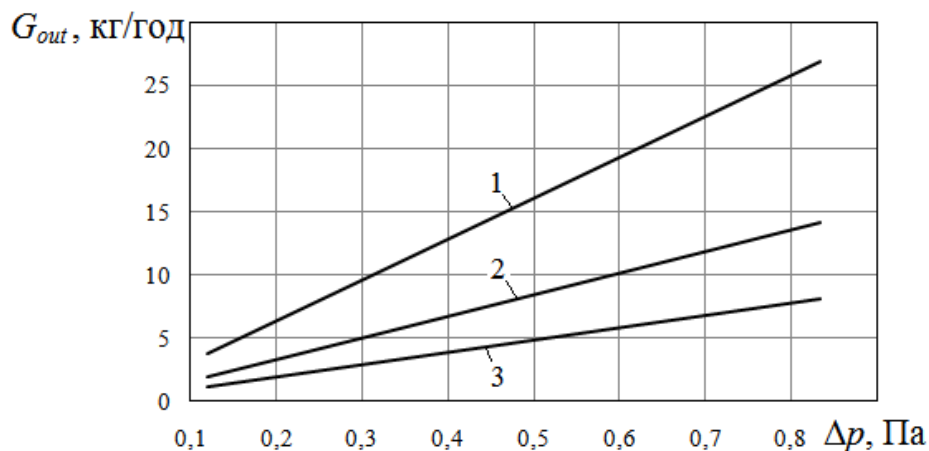


Рис. 5. Залежність витрат повітря, що видаляється через теплообмінник з приміщення в довкілля, від перепаду тиску Δp між вхідними і вихідними перерізами каналів теплообмінника:
1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

теплоти, хоча загальна площа теплообмінних поверхонь при цьому збільшується.

Що стосується температури теплоносіїв, що змінюються в каналах теплообмінника внаслідок передачі теплоти від одного теплоносія до іншого, то залежність цих температур від перепадів тиску між перерізами каналів виявляється різною в залежності від кількості каналів в теплообміннику.

Для випадку семи каналів та семи теплообмінних поверхонь зі збільшенням тиску зменшується різниця між температурами повітря, що надходить в теплообмінник та виходить з нього. Тобто температура теплоносія, що надходить в приміщення – зменшується, а температура повітря, що видаляється з приміщення – збільшується.

Для випадку одинадцяти каналів (криві 3) зі збільшенням перепадів тиску між перерізами каналів різниця між температурою теплоносія на вході та виході з теплообмінника також збільшується. Тобто збільшується температура повітря, що подається в приміщення, і зменшується температура повітря, що видаляється з приміщення.

Для випадку дев'яти каналів зі збільшенням перепаду тиску Δp від 0,1 Па до 0,3 Па температура повітря, що видаляється в довкілля, зменшується, а далі, зі збільшенням перепаду тиску Δp від 0,3 Па до 0,9 Па температура повітря, що видаляється в довкілля, збільшується. Водночас при збільшенні перепаду тиску від 0,1 Па до 0,3 Па температура зовнішнього

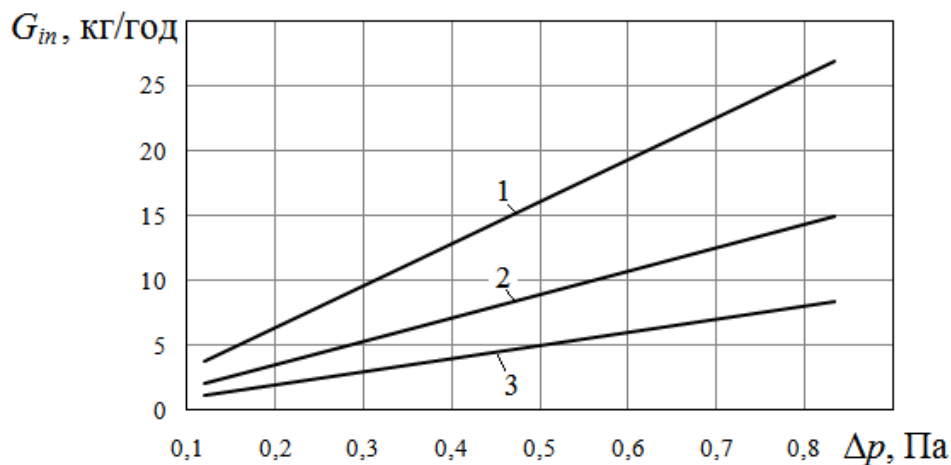


Рис. 6. Залежність витрат повітря, що надходить з довкілля в приміщення через теплообмінник, від перепаду тиску Δp між вхідними і вихідними перерізами каналів теплообмінника:

1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

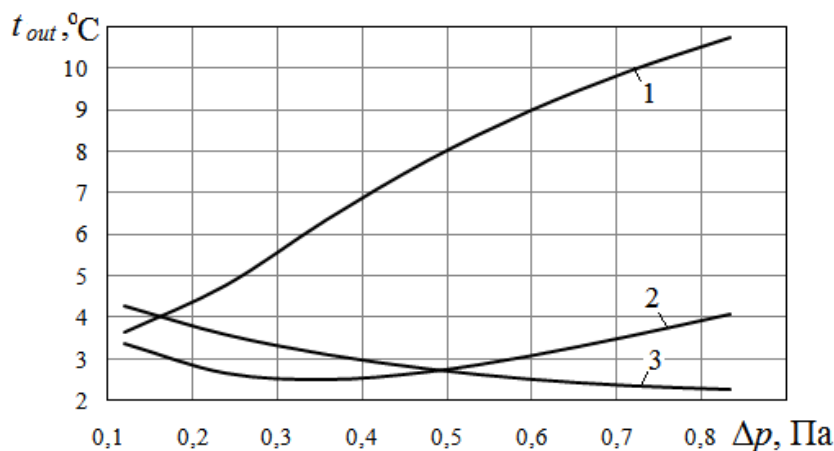


Рис. 7. Залежність температури повітря, що видаляється через теплообмінник з приміщення в довкілля, від перепаду тиску Δp між вхідними і вихідними перерізами каналів теплообмінника:

1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

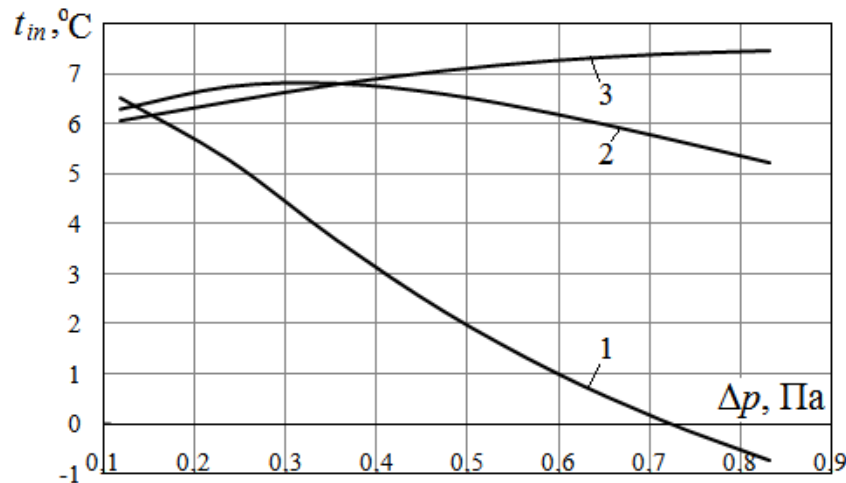


Рис. 8. Залежність температури повітря, що надходить з довкілля в приміщення через теплообмінник, від перепаду тиску Δp між вхідними і вихідними перерізами каналів теплообмінника: 1 - 7 каналів; 2 - 9 каналів; 3 - 11 каналів

повітря, що надходить в приміщення, збільшується, а зі збільшенням перепаду тиску від 0,3 Па до 0,9 Па температура повітря, що надходить в приміщення з довкілля – зменшується. Отже, при дев'яти каналах в теплообміннику крива залежності температури t_{out} повітря, що видаляється з приміщення, має при $\Delta p=0,3$ Па мінімум, а крива залежності температури t_{in} повітря, що надходить в приміщення з довкілля, при $\Delta p=0,3$ Па має максимум.

Висновки

За результатами чисельного моделювання досліджено характеристики теплообмінника, який представляє собою систему співвісних кільцевих каналів типу «труба в трубі». Цей теплообмінник входить до складу системи рекуперативної вентиляції приміщення. Для випадків різної кількості і розмірів кільцевих каналів в теплообміннику одержано залежності основних характеристик роботи теплообмінника від перепаду тиску між вхідним і вихідним перетинами каналів. Серед них - обсяг теплої, що передається від потоку повітря, що видаляється з приміщення, до потоку повітря, що надходить зовні, витрати повітря, а також ступені охолодження та нагріву повітряних потоків, що проходить через теплообмінник та між якими відбувається теплообмін. Виявлено, що залежності цих ступенів нагріву та охолодження повітряних потоків від перепадів тиску між перерізами каналів виявляється різними для теплообмінників з різною кількістю каналів та різною шириною цих каналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Машиностроение, 1967. – 224 с.
2. Gužela Š., Dzianik F. The recuperative heat exchangers – the mean temperature difference in the special cases of heat transfer. Journal of mechanical engineering. 2020.-Vol 70, No 1.- 47 – 56.
DOI: 10.2478/scjme-2020-0005.
3. Tzabar N.A. Numerical Study on Recuperative Finned-Tube Heat Exchangers. Cryocoolers 18, edited by S.D. Miller and R.G. Ross, 2014-407 – 415.
4. Ercan Ataer O. An approximate method for transient behavior of finned-tube cross-flow heat exchangers. International journal of refrigeration. 2004. Vol. 27, Issue 5. 529-539. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.02.005>.
5. Malinowski L., Bielski S. An analytical method for calculation of transient temperature field in the counter-flow heat exchangers. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2004.-Vol. 31, Issue 5, 683-691. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(04\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(04)00055-7)
6. Damle R.M., Ardhapurkar P.M., Atrey M.D. Numerical simulation of tubes-in-tube heat exchanger in a mixed refrigerant Joule–Thomson cryocooler. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 171(2017) 012070 doi:10.1088/1757-899X/171/1/012070
7. Węglarz K., Taler D., Taler J., Marcinkowski M. New calculation method for tube cross-flow heat exchangers. E3S Web of Conferences 323, 00032 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300032>.
8. Rup K. Calculation of the heat power of a tube heat exchanger. Archives of thermodynamics. 2022.- Vol. 43, No. 1, 127–140. DOI: 10.24425/ather.2022.140928

HEAT TRANSFER IN THE CHANNELS OF THE HEAT EXCHANGER INTENDED FOR THE RECOVERY VENTILATION SYSTEM OF THE ROOM

Basok B.I.¹, Beljaeva T.G.², Davydenko D.B.³

¹*Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doc. Tech. Sci., Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-8935-4248, e-mail: borys.basok@gmail.com*

²*PhD (Engin.), Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9748-6662, e-mail: tatgbel@ukr.net*

³*Postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0009-0003-5791-1980, e-mail: dwalin@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.2>

Air exchange, or ventilation, systems are created to ensure comfortable conditions in rooms in terms of temperature, humidity, and oxygen content in the air. In energy-efficient buildings, the organization of such a system should include energy-saving measures. Among such measures, it should be noted the use of a recuperative heat exchanger, which provides partial heating of the cold outdoor air from the warm air removed from the room in the winter. This paper examines the characteristics of the heat exchanger - recuperator, which is a system of coaxial cylindrical surfaces made of copper. That is, this heat exchanger is a system of annular channels of the "tube-in-tube" type. Technical characteristics are defined for this heat exchanger, which include: thermal power, that is, the amount of heat transferred in the heat exchanger from one heat carrier to another per unit of time; consumption of heat carriers; the temperature of the air removed from the room into the environment after the recuperator; the temperature of the outside air entering the room after the recuperator. The dependence of these characteristics on the number and sizes of annular channels in the heat exchanger and on the pressure drop between the inlet and outlet cross-sections of the channels is investigated. It was determined that the

dependence of the degrees of heating and cooling of air flows in the heat exchanger channels on the pressure differences between the inlet and outlet cross sections of the channels are different for heat exchangers with different number of channels and different widths.

References 8, Figures 8.

Key words: recuperator, heat exchanger, air exchange, ventilation, numerical modeling.

1. Kays W.M., London A.L. [Compact Heat Exchangers]. M Mashinostroyeniye, 1967. 224 p. (in rus.)

2. Gužela Š., Dzianik F. The recuperative heat exchangers—the mean temperature difference in the special cases of heat transfer. Journal of mechanical engineering. 2020. Vol 70, No 1. 47 – 56. DOI: 10.2478/scjme-2020-0005.

3. Tzabar N.A. Numerical Study on Recuperative Finned-Tube Heat Exchangers. Cryocoolers 18, edited by S.D. Millerand R.G. Ross, 2014, 407 – 415.

4. ErcanAtaer O. An approximate method for transient behavior of finned-tube cross-flow heat exchangers. International journal of refrigeration. 2004. Vol. 27, Issue 5. 529-539. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.02.005>.

5. Malinowski L., Bielski S. An analytical method for calculation of transient temperature field in the counter-flow heat exchangers. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 31, Issue 5, 683-691. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(04\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(04)00055-7)

6. Damle R.M., Ardhapurkar P.M., Atrey M.D. Numerical simulation of tubes-in-tube heat exchanger in a mixed refrigerant Joule–Thomson cryocooler. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 171(2017) 012070 doi:10.1088/1757-899X/171/1/012070

7. Węglarz K., Taler D., Taler J., Marcinkowski M. New calculation method for tube cross-flow heat exchangers. E3S Web of Conferences 323, 00032 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300032>.

8. Rup K. Calculation of the heat power of a tube heat exchanger. Archives of thermodynamics. 2022.- Vol. 43, No. 1, 127–140. DOI: 10.24425/ather.2022.140928

Отримано 05.08.2024

Received 05.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 664.1

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНЕ ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЯК ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Ободович О.М.¹, д.т.н., Хоменко В.О.², Сидоренко В.В.³, к.т.н., Степанова О.Є.⁴, к.т.н.

¹професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net

²гол. конструктор Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03057, Україна, e-mail: xbo1959@gmail.com

³с.н.с., старший дослідник Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>, e-mail: vrangel08@i.ua

⁴с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.3>

В статті наведено техніки та технології вітчизняного цукрового виробництва, технології отримання і наступного очищення дифузійного соку. Запропоновано використання дискретно-імпульсного введення енергії для підвищення ефективності та вдосконалення очищення дифузійного соку.

The article describes techniques and technologies of domestic sugar production, technologies for obtaining and subsequent purification of diffusion juice. The use of discrete-pulse energy input is proposed to increase the efficiency and improve the purification of the diffusion juice.

Бібл. 13, табл. 1.

Ключові слова: дискретно-імпульсне введення енергії, дифузійний сік, роторно-пульсаційний апарат, інтенсифікація тепломасообмінних процесів, енергозберігаючі теплотехнології, цукрове виробництво.

К – коефіцієнт, що враховує вплив інтенсивності пульсаційних впливів на швидкість процесу поглинання;
Ф – фактор прискорення абсорбції хімічною реакцією;
 N_x – швидкість поглинання;
 C_p – розчинність CO_2 у клеровці;

C_o – концентрація газу в основній масі рідини, кмоль/м³;
F – площа поверхні розділу фаз, м²;
 β_j – коефіцієнт масовиддачі в рідкій фазі, м/с;
ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії;
РПА – роторно-пульсаційний апарат.

Вступ.

Ефективність переробки цукробурякової сировини у значній мірі залежить від його якості, технології отримання і наступного очищення дифузійного соку. Сучасний стан техніки та технології вітчизняного цукрового виробництва не забезпечує достатньої повноти вилучення сахарози з буряків, високоефективне вапняно-вуглекислотне очищення, внаслідок чого не може досягнути середньосвітових показників. Вирішенням цих проблем є вдосконалення існуючих та створення інноваційних технологій переробки цукрових буряків з застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [1-3].

У технологічному процесі цукрового виробництва гідроксид кальцію та діоксид вуглецю є основними ре-

агентами, застосовуваними для очищення дифузійного соку. Саме очищення дифузійного соку з використанням гідроксиду кальцію та діоксиду вуглецю є одним з найважливіших процесів цукробурякового виробництва, що значною мірою визначає ефективність використання сировини, паливно-енергетичних та матеріальних ресурсів, а також кінцеві результати роботи заводу. В даний час витрата гідроксиду кальцію, що додається до дифузійного соку в процесі очищення становить до 1,5-2,0 % CaO до маси буряків, що не можна вважати оптимальним, оскільки він значно перевищує теоретично необхідний для проведення реакцій осадження не цукрів. Також, середня величина витрати умовного палива за кордоном тривалий час знаходиться на рівні 3,0-3,3 % до маси буряків, тоді як на ряді підприємств України він сягає 4,8-4,9 %.

Теоретична кількість реагентів, потрібних для проведення вапняно-вуглекислотного очищення, розраховується виходячи з чистоти дифузійного соку. Відомо, що дифузійний сік цукробурякового виробництва є полікомпонентною системою, до складу якої входить сахароза та супутні речовини (нецукри), представлені розчинними білками, пектиновими сполуками та продуктами їх розкладання, редукуючими цукрами, амінокислотами, азотистими сполуками, солями органічних та неорганічних кислот. При знецукровуванні бурякової стружки за типовою (дифузійною) технологією з неї в дифузійний сік переходить 95-98 % сахарози та близько 80 % розчинних нецукрів.

Всі нецукри більшою чи меншою мірою перешкоджають отриманню кристалічної сахарози і збільшують вихід меляси, тому одним із основних завдань технології цукрового виробництва є максимальне видалення нецукрів з виробничих цукромістких розчинів (напівпродуктів). Враховуючи це, кожна технологічна операція цукробурякового виробництва повинна забезпечувати проведення очищення напівпродуктів від нецукрів.

Отже, для зниження ресурсомісткості цукробурякового виробництва необхідно вже на стадії вилучення сахарози проводити процес таким чином, щоб отримувати дифузійний сік із чистотою вище чистоти клітинного соку, перешкоджаючи переходу в нього нецукрів, за мінімально можливої величини його відбору. Дотри-

мання цих двох критеріїв дозволить збільшити ефект очищення на дифузії та знизити потреби паливно-енергетичних ресурсів на стадії згущення очищеного соку до сиропу. Іншою складовою високоефективної технології переробки цукрових буряків є вапняно-вуглекислотне очищення дифузійного соку, що забезпечує низьку витрату вапнякового каменю, вугілля на його випал, допоміжних матеріалів та інших супутніх витрат. Це дозволить скоротити собівартість товарного цукру, тобто підвищить його конкурентоспроможність [4].

Метою роботи є довести можливість підвищення ефективності очищення дифузійного соку при використанні методу ДІВЕ.

Порівняльні показники якості очищених соків, одержаних за типовою та вдосконаленою технологіями отримання дифузійного соку та його очищення, представлені в таблиці 1 [4].

З представлених даних видно, що отриманий по удосконаленій технології очищений сік має більш високу якість. Так, ефект розкладання редукуючих речовин у удосконаленій технології (91,4 %) вище, порівняно з типовою технологією (81,5 %), а ефект переходу високомолекулярних сполук та колоїдних речовин у очищений сік нижче – 37,9 та 30,6 % відповідно. Вміст солей кальцію в соку, отриманому по удосконаленій технології, нижче на 0,016 % СаО до маси соку ніж у соку, очищеному за типовою технологією, або на 22,5 % (абсолютних). Зрештою, удосконалена технологія забезпечує збільшення ефекту очищення дифузійного соку на 5,8 %.

Табл. 1. Порівняльні показники якості очищених соків, одержаних за типовою та вдосконаленою технологіями отримання дифузійного соку та його очищення

Найменування показника	Значення показника	
	Технологія отримання та очищення	
	типова	вдосконалена
Реакція середовища (pH)	9,2	9,2
Вміст солей кальцію, % СаО до маси соку	0,071	0,055
Вміст солей кальцію, % до маси сухих речовин	0,696	0,391
Вміст високомолекулярних сполук, % до маси сухих речовин	3,97	3,20
Ефект переходу високомолекулярних сполук, % до маси сухих речовин	37,9	30,6
Вміст редукуючих речовин, % до маси соку	0,1131	0,0511
Вміст редукуючих речовин, % до маси сухих речовин	1,0775	0,5009
Ефект руйнування редукуючих речовин, %	81,5	91,4
Чистота, %	88,43	89,30
Збільшення чистоти, %	-	0,87
Ефект очищення, %	30,6	36,4

В результаті проведеного комплексу теоретичних та експериментальних досліджень розроблено високоефективну технологію двостадійного вилучення дифузійного соку та його очищення, що дозволяє:

- зменшити відбір дифузійного соку на 10-15 % до маси буряків;
- знизити вміст солей кальцію в очищеному соку на 0,015-0,017 % CaO до маси соку;
- знизити ефект переходу високомолекулярних сполук в очищений сік на 7,0-7,5 %;
- підвищити ефект розкладання редуруючих речовин на 9,5-10,5 %;
- підвищити чистоту очищеного соку на 0,8-0,9 %.

Одним з основних напрямків інтенсифікації процесів очищення цукрових розчинів є розробка таких теоретично обґрунтованих методів, які дозволяють скоротити витрату вапна й сатураційного газу на здійснення технологічних процесів. Все більшого значення набуває можливо повне використання CO_2 і SO_2 з сатураційного та сульфатаційного газу в умовах цукрового виробництва, як з погляду інтенсифікації тепломасообмінних процесів, так і з точки зору зменшення шкідливих викидів в атмосферу [5].

Одним із методів інтенсифікації тепломасообмінних процесів є метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), який реалізується за рахунок роторно-пульсаційних апаратів (РПА). В цукровій промисловості є декілька технологічних процесів, які можуть бути проведені в РПА. Такі апарати вигідно відрізняються від відомих простотою конструкції, можуть працювати в широкому діапазоні зміни параметрів газу, дозволяють легко регулювати робочий процес, мають низьку металоємкість, високу інтенсивність тепломасообмінних процесів. Крім того, при таких перевагах вони також можуть бути виготовлені в майстернях цукрових заводів за власні кошти.

До процесів, що можуть бути здійснені в цукровій промисловості в РПА, можуть бути віднесені:

- активація вапняного молока;
- змішування компонентів фаз (цукрового соку та вапняного молока) для проведення наступного процесу дефекації цукрового розчину;
- проведення процесу першої сатурації;
- проведення процесу другої сатурації.

З метою інтенсифікації змішування дифузійного соку та вапняного молока з активацією останнього, запропоновано використовувати РПА, що дозволяють ви-

користати ефекти кавітації для подрібнення нерозчиненого вапна, його активації та інтенсивного змішування.

В випадку використання РПА можливо значно спростити конструкцію обладнання для змішування, розчинення, диспергування та використати ефекти гідродинамічної взаємодії потоків.

Відома також проблема цукрового заводу, що стосується необхідності зменшення витрат вапнякового молока на процес дефекації. Вона витікає з того, що в процесах хімічного очищення соку від нецукрів основну роль відіграє хімічно активне вапнякове молоко. А в вапняковому молоці, яке подається на дефекацію, крім розчиненого вапна знаходиться деяка кількість вапна і в вигляді нерозчинених грудочок, з'єднань з нецукрами. При цьому частина вапна не приймає участі в очищенні цукрового розчину, а витрати його великі. Для активації запропоновані РПА [6], принцип дії яких оснований на явищах ДІВЕ.

Активація вапнякового молока в таких апаратах досягається завдяки явищам ударної хвилі, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, протікаючих кумулятивних мікроструменів та вихорів, які викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Гейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного подрібнення дисперсних включень, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесів тепломасопереносу.

Найбільш ефективним може бути застосування РПА для інтенсифікації технологічних процесів очищення дифузійного соку та супутніх операцій, зокрема активації водно-вапняної суміші [7, 8]. Інтенсифікація процесу попередньої дефекації дифузійного соку полягає в прокачуванні соку через робочі органи РПА, у якому відбуваються одночасно процеси диспергування, розчинення та змішування реагентів за рахунок ударно-хвильової дії під час колапсу кавітаційних бульбашок. Оброблення водно-вапняної суспензії в РПА призводить до скорочення її витрати на очищення дифузійного соку та підвищить технологічні показники соку на стадії очищення [9].

Підвищення реакційної здатності водно-вапняної суспензії буде проходити за рахунок збільшення ступеня диспергування твердих частинок суспензії та зростання їх поверхневої енергії, а також зміни фізичних властивостей води. Ступінь активації вапна залежить в основному від кількості і розмірів кавітаційних бульбашок, що утворюються за суперкавернами. За розрахунками швидкість кумулятивних мікроструменів, при

якій захоплюються бульбашки, визначається переважно їх початковим розміром і тиском в оточуючій рідині і може досягати 550-1000 м/с. Кумулятивні струмені не тільки подрібнюють частинки суспензії, що приводить до збільшення їх поверхневої енергії, а й, очевидно, розривають водневі зв'язки води, про що свідчить підвищення її електропровідності.

За рахунок зміни конструктивних особливостей РПА та режимів обробки можна регулювати розміри кавітаційних бульбашок і, відповідно, ступінь активації вапна.

Попереднє оброблення дифузійного соку в РПА [10] сприятиме кращому його дефекосатураційному очищенню, зменшенню забарвленості і вмісту солей кальцію в соку першої сатурації, підвищенню доброякісності соку. Відсатурований сік швидше відстоюється і краще фільтрується.

Підвищення ефективності сатурації також можуть бути здійснені у РПА, в якому хімічній реакції взаємодії в рідкому середовищі іонів кальцію Ca^{2+} з вугільною кислотою та утворення карбонату кальцію



передусе масоперенесення CO_2 з газової фази в реакційну систему, що підпорядковується законам масопередачі при абсорбції. Швидкість утворення CaCO_3 , тобто процесу сатурації, обумовлена реакцією, що протікає з мінімальною швидкістю. Як показано, швидкість фізичної абсорбції (розчинення) вуглекислого газу в соці з подальшим утворенням вугільної кислоти порівняно невелика, залежить від величини рН середовища та концентрації сахарози, що присутня в розчині, і тому є лімітуючою стадією всього багатостадійного процесу сатурації [11].

Отже, поряд з кінетикою масообміну при абсорбції CO_2 і наступних хімічних реакцій, на швидкість процесу сатурації істотно впливає гідродинамічна обстановка в РПА, яка залежить від частоти пульсацій потоку середовища, що оброблюється, кількості циклів обробки, швидкості зсуву потоку і т.п.

Технологічні результати перевірки способу сатурації в РПА підтвердили, що при однакових енергетичних витратах, що виражаються турбулентною енергією, що дисипується, пульсаційні впливи є більш ефективними, ніж стаціонарний процес. При цьому частина енергії йде на утворення поверхні дисперсій і, головним чином, її відновлення, що компенсує коалесценцію, а інша частина йде на деформацію цієї поверхні під дією турбулентних пульсацій.

Швидкість поглинання N_x діоксида вуглецю розчином клеровки можна визначити за формулою

$$N_x = K \cdot \Phi \cdot \beta_{\text{ж}} \cdot F \cdot (C_p - C_o), \quad (2)$$

де K – коефіцієнт, що враховує вплив інтенсивності пульсаційних впливів на швидкість процесу поглинання; Φ – фактор прискорення абсорбції хімічною реакцією; $\beta_{\text{ж}}$ – коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі, м/с; F – площа поверхні розділу фаз, м^2 ; C_p – розчинність CO_2 у клеровці; C_o – концентрація газу в основній масі рідини, кмоль/м^3 .

Відомо, що при постійних фізико-хімічних властивостях дисперсної системи “рідина – газ” об’ємний коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі при турбулізації залежить від потужності перемішування та газовмісту. Виходячи з аналізу процесу сатурації, було зроблено акцент на підвищенні потужності механічного перемішування в РПА, який пропорційний швидкості дисипації енергії – чим вона більша, тим вища швидкість розсіювання енергії в апаратах.

Використання активованого вапняного молока підвищує чистоту очищеного соку в порівнянні з типовою схемою на 0,7-0,8 %, при активації соку після холодної defeкації – на 1,5-1,6 %, а при одночасному використанні обох варіантів – на 1,8-1,9 %. Відомо, що збільшення чистоти очищеного соку на 1 % збільшує вихід цукру на 0,25 %.

При обробці в активаторі соку після холодної defeкації за рахунок гідродинамічної кавітації та механічної дії робочих органів виникають такі явища [12-13]:

1) Збільшення ступеня дисоціації молекул води та інших органічних та неорганічних сполук, що призводить до прискорення хімічних реакцій за іонним типом.

2) Гомолітичний розпад води на вільні радикали з утворенням перекису водню та озону, які розкладаються з виділенням надзвичайно реакційно-здатного атомарного кисню



Під впливом останнього відбувається окислення редуруючих речовин до органічних кислот з різною довжиною вуглецевих ланцюжків, органічних речовин (у тому числі гумінових) до вуглекислого газу та води, солей двохвалентного заліза (у тому числі пофарбованих комплексів фенолів з катіонами заліза) до нерозчинних сполук, високомолекулярних пофарбованих речовин (у тому числі і меланоїдинів) з утворенням нерозчинних

сполук, розрив пептидних зв'язків у білкових молекулах, а також розкладання амінокислот і переведення меланінів – барвників – у безбарвні сполуки.

3) Гомолітичний розпад органічних речовин на вільні радикали з подальшою рекомбінацією та утворенням сполук з меншою довжиною вуглецевих ланцюжків – фракціонування. При цьому утворюються кислоти, кальцієві солі яких малорозчинні або нерозчинні, що є причиною отримання очищених цукромістких розчинів з меншим вмістом солей кальцію.

4) Швидке і рівномірне змішування цукромістких розчинів з вапняним молоком, що сприяє підвищенню швидкості хімічних реакцій на дефекації.

5) Подрібнення частинок вапна, при якому підвищується їх розчинність та реакційна здатність на дефекації; на сатурації збільшується швидкість її розчинення і нейтралізації, а так само питома поверхня карбонату кальцію, що утворюється.

Всі ці процеси тією чи іншою мірою впливають на підвищення ефективності очищення дифузійних соків.

Висновки.

Високоєфективна технологія та обладнання вапняно-вуглекислотного очищення дифузійного соку дозволить скоротити собівартість товарного цукру та підвищити його конкурентоспроможність.

Для цього може бути використаний метод ДІВЕ – принципово новий спосіб інтенсифікації гідродинамічних та тепломасообмінних процесів.

Застосування методу ДІВЕ та РПА для його реалізації у цукровій промисловості дозволяє проводити процеси перемішування, диспергування, розчинення, нагрівання, гомогенізації одночасно в одному апараті. Роторно-пульсаційні апарати можуть замінити кавітаційні пристрої, гомогенізатори, диспергатори, тому що проходячи через їх робочі органи (статор-ротор) рідина піддається не тільки кавітації, але і дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, проникаючим кумулятивним мікрострумам, вихорам, що викликає на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного дроблення дисперсних включень, збільшення сумарної поверхні контакту фаз та підвищення процесів тепломасоперенесення. Подібні ефекти є недосяжними при використанні традиційних кавітаційних пристроїв.

Використання методу ДІВЕ і роторно-пульсаційних апаратів, в яких він реалізується, можливо на етапах активації вапняного молока, змішування цукрового соку та вапняного молока, сатурації та ін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Oleksandr Obodovych, Vitalii Sydorenko, Bohdan Tselen, Olesya Stepanova, Tetyana Rezakova. Application of discrete-pulse energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. Scientific research in modern conditions of instability '2023. Monographic series «European Science». Karlsruhe, Germany. Book 24. Part 1. 2023. pp. 59-67. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-001.
2. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Pereiaslavtseva O., Khomenko V. Discrete-pulsed energy input in wastewater treatment technologies. Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. 2023. Vol. 34, No. 3. P.45-56. <https://doi.org/10.20535/2218-930032022266601>.
3. Ободович О., Сидоренко В., Булій Ю., Степанова О. Застосування метода дискретно-імпульсного введення енергії в технологіях обробки крохмалевмісної сировини. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: collective monograph / International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. 461 p. ISBN – 979-8-88992-703-7. DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.6.5.
4. Городецкий В.О., Семенихин С.О., Люсьй И.Н., Даишева Н.М., Котляревская Н.И., Усманов М.М. Инновационная технология двухстадийного получения диффузионного сока свеклосахарного производства и его очистки // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 132 (08). Doi: 10.21515/1990-4665-132-073.
5. Вискребцов В.Б., Пономаренко В.В. Інтенсифікація технологічних процесів в цукровій промисловості на основі ежекційних методів // Харчова наука і технологія. 2011. № 3 (16). С. 87-90.
6. Штангеев В.О., Корбер В.Т., Белостоцкий Л.Г. и др. Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства / под ред. В.О. Штангеева. Ч.1 – К: Цукор України, 2003. С. 334-341.
7. Немчин А.Ф. Опыт применения суперкавитирующих аппаратов в сахарной промышленности: Обзорная информация / Немчин А.Ф. – М.: ЦНИИТЭИПищепром, 1986. Вып. 1. 32 с.
8. Немчин А.Ф., Аникеев Ю.В., Жижина Р.Г. и др. Гидродинамические методы интенсификации процессов очистки диффузионного сока // Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИПищепром, 1984. Вып. 8. 28 с.
9. Немчин А.Ф., Савченко О.А., Анистратенко В.А. Кавитационно-кумулятивное диспергирование известковых суспензий // Новое в технике сахарного производства: Сб. науч. тр. – М.: Агропромиздат, 1986. С. 63-67.

10. *Немирович П.М., Жеплінська М.М., Матіяшук А.М., Хомічак Л.М.* Застосування пароконденсаційної кавітації в бурякоцукровому виробництві. Вібрації в техніці та технологіях. 2008. № 2. С. 102-104.

11. *Бугаєнко И.Ф.* Общая технология отрасли: научные основы технологии сахара / И.Ф. Бугаєнко, В.И. Тужилкин. – Ч. I. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 512 с.

12. *Савостин А.В., Литош А.Н.* Совершенствование способов очистки сахарсодержащих растворов. Сахарная пром-сть. 2005. № 3. С. 44-46.

13. *Савостин А.В., Литош А.Н.* Способ очистки сахарсодержащих растворов. Сахарная пром-сть. 2004. № 2. С. 40-42.

DISCRETE-PULSE INPUT OF ENERGY AS INCREASE IN THE EFFICIENCY OF SUGAR PRODUCTION

Obodovych O.M.¹, Khomenko V.O.², Sydorenko V.V.³, Stepanova O.E.⁴

¹Dr. Sci. (Engin.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net

²Chief designer, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: xbo1959@gmail.com

³PhD (Engin.), Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7735-7719, e-mail: vrangel08@i.ua

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7179-7251, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.3>

The article describes techniques and technologies of domestic sugar production, technologies for obtaining and subsequent purification of diffusion juice. The use of discrete-pulse energy input is proposed to increase the efficiency and improve the purification of the diffusion juice.

The efficiency of sugar beet raw material processing largely depends on its quality, production technology and subsequent purification of the diffusion juice. The current state of equipment and technology of domestic sugar production does not ensure the sufficient completeness of sucrose extraction from beets, highly effective lime-carbonic acid purification, as a result of which it does not ensure the achievement of world average indicators. The solution to these problems is the improvement of the existing and the creation of innovative technologies for sugar beet processing using the method of discrete-pulse energy input (DPEI).

The technological results of the verification of the method of saturation in the RPA confirmed that with the same energy consumption, expressed by the turbulent dissipated energy, the pulsating effects are more effective than the stationary process. At the same time, part of the

energy goes to the formation of the dispersion surface and, mainly, its recovery, which compensates for coalescence, and the other part goes to the deformation of this surface under the action of turbulent pulsations.

The application of the DPEI and RPA method for its implementation in the sugar industry allows the processes of mixing, dispersion, dissolution, heating, and homogenization to be carried out simultaneously in one apparatus. Rotor-pulsation devices can replace cavitation devices, homogenizers, dispersers, because when passing through their working organs (stator-rotor), the liquid is exposed not only to cavitation, but also to the action of shock waves, interphase turbulence, penetrating cumulative microcurrents, eddies, which causes interphase Rayleigh-Taylor or Kelvin-Helmholtz instability surfaces, which leads to intense crushing of dispersed inclusions, an increase in the total contact surface of the phases, and an increase in heat and mass transfer processes. Similar effects are unattainable when using traditional cavitation devices.

Key words: discrete-pulse energy input, diffusion juice, rotary-pulsation apparatus, intensification of heat and mass exchange processes, energy-saving heat technologies, sugar production.

References 13, tables 1.

1. Oleksandr Obodovych, Vitalii Sydorenko, Bohdan Tselen, Olesya Stepanova, Tetyana Rezakova. (2023). Application of discrete-pulse energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. Scientific research in modern conditions of instability '2023. Monographic series «European Science». Karlsruhe, Germany. Book 24. Part 1. 2023. pp. 59-67. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-001.

2. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Pereiaslavl'tseva O., Khomenko V. (2023). Discrete-pulsed energy input in wastewater treatment technologies. Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. Vol. 34, No. 3. pp. 45-56. <https://doi.org/10.20535/2218-930032022266601>.

3. Obodovych O., Sydorenko V., Buliy YU., Stepanova O. (2023). Zastosuvannya metoda dyskretno-impul'snoho vvedennya enerhiyi v tekhnolohiyakh obrobky krokhmalevmisnoyi syrovyny [Application of the method of discrete-pulse energy input in technologies for processing starch-containing raw materials]. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: collective monograph / International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. 461 p. ISBN 979-8-88992-703-7. DOI 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.6.5. (in Ukr.)

4. Gorodetsky V.O., Semenikhin S.O., Lyusy I.N., Daisheva N.M., Kotlyarevskaya N.I., Usmanov M.M. (2017). Innovatsionnaya tekhnologiya dvukhstadiynogo polucheniya diffuzionnogo soka sveklosakharnogo proizvodstva i yego ochistki [Innovative technology for two-stage production of diffusion juice from beet sugar production and its purification]. Nauchnyy zhurnal KubGAU. № 132 (08). Doi: 10.21515/1990-4665-132-073. (in Rus.)
5. Viskrebtsov V.B., Ponomarenko V.V. (2011). Intensyfikatsiya tekhnolohichnykh protsesiv v tsukroviy promyslovosti na osnovi ezheksiyinykh metodiv [Intensification of technological processes in the sugar industry based on ejection methods]. Food science and technology. № 3 (16). pp. 87-90. (in Ukr.)
6. Shtangeyev V.O., Korber V.T., Belostotskiy L.G. i dr. (2003). Sovremennyye tekhnologii i oborudovaniye sveklosakharnogo proizvodstva [Modern technologies and equipment for beet sugar production]. Ch.1 – K: Tsukor Ukrayiny. pp. 334-341. (in Rus.)
7. Nemchin A.F. (1986). Opyt primeneniya superkavitiruyushchikh apparatov v sakharoy promyshlennosti: Obzornaya informatsiya [Experience in using supercavitating devices in the sugar industry: Overview information] – M.: TsNIITEIPishcheprom. 1. 32 p. (in Rus.)
8. Nemchin A.F., Anikeyev YU.V., Zhizhina R.G. i dr. (1984). Gidrodinamicheskiye metody intensifikatsii protsessov ochistki diffuzionnogo soka [Hydrodynamic methods for intensifying diffusion juice purification processes]. Overview information. – M.: TsNIITEIPishcheprom. 8. 28 p. (in Rus.)
9. Nemchin A.F., Savchenko O.A., Anistratenko V.A. Kavitatsionno-kumulyativnoye dispergirovaniye izvestkovykh suspenziy [Cavitation-cumulative dispersion of lime suspensions]. New in sugar production technology: Sb. nauch. tr. – M.: Agropromizdat, 1986. pp. 63-67. (in Rus.)
10. Nemyrovych P.M., Zheplinska M.M., Matyyashchuk A.M., Khomichak L.M. (2008). Zastosuvannya paro-kondensatsiynoyi kavitatsiyi v buryakotsukrovomu vyrobnytstvi [Application of vapor condensation cavitation in beet sugar production]. Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. 2. pp. 102-104. (in Ukr.)
11. Bugayenko I.F. (2007). Obshchaya tekhnologiya otrasli: nauchnyye osnovy tekhnologii sakhara [General industry technology: scientific basis of sugar technology]. Ch. I. – SPb.: GIOR. 512. (in Rus.)
12. Savostin A.V., Litosh A.N. (2005). Sovershenstvovaniye sposobov ochistki sakharsoderzhashchikh rastvorov [Improving methods for purifying sugar-containing solutions]. Sakhar naya prom-st'. 3. pp. 44-46. (in Rus.)
13. Savostin A.V., Litosh A.N. (2004). Sposob ochistki sakharsoderzhashchikh rastvorov [Method for purifying sugar-containing solutions]. Sakhar naya prom-st'. 2. pp. 40-42. (in Rus.)

Отримано 08.07.2024
Received 08.07.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 620.22 419:536.2

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ ВВКМ-21 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Боровик Д.В.¹, Євдокименко Ю.І.², Фролов Г.О.³, Круковский П.Г.⁴, Скляренко Д.І.⁵¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, науковий співробітник, orcid.org/0000-0003-4668-3778, e-mail: dmitryb2007@gmail.com²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, науковий співробітник, [orsid.org/0000-0002-3344-798X](https://orcid.org/0000-0002-3344-798X), e-mail: yevd@meta.ua³докт. техн. наук, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, завідувач лабораторії матеріалів аерокосмічної техніки ІПМ НАНУ, orcid.org/0000-0001-7045-310X, e-mail: g_frolov@ukr.net⁴докт. 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.net⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник, orcid.org/0000-0002-0431-2111, e-mail: cklyr90@bigmir.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.4>

Розглянута методика та результати визначення температурних залежностей теплоємності і недостатньо відомої теплопровідності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 до 1200 К, який використовується для теплового захисту космічних апаратів. Теплопровідність такого матеріалу має значну залежність від напрямку дії теплового потоку (вздовж або поперек) по відношенню до орієнтації вуглецевих волокон. Теплоємність визначалась за допомогою приладу ІТ-с-400 і універсального розрахункового комплексу «АСТРА 4.0». Теплопровідність визначалась розрахунково-експериментальним методом (температурні вимірювання+моделювання і метод зворотних задач), який дозволив отримати залежності теплопровідності ВВКМ-21 від температури для орієнтацій вздовж волокон в діапазоні $1,9 \div 2,7 \text{ Вт/(м·К)}$ і поперек - в діапазоні $3,2 \div 1,3 \text{ Вт/(м·К)}$.

The methodology and results of determining the heat capacity and thermal conductivity of the thermal protection carbon-carbon composite material CCCM-21 are considered. This material exhibits a significant dependence on the direction of the heat flow relative to the orientation of the carbon fibers and is used for thermal protection of spacecraft up to 1200 K. Heat capacity was determined using the IT-C-400 device and the universal calculation complex «ASTRA 4.0». The inverse heat conduction method was used to obtain the temperature dependence of the thermal conductivity of CCCM-21. For orientations along the fibers, thermal conductivity was measured from 1.9 to 2.7 W/(m·K), and from 3.2 to 1.3 W/(m·K) across the fibers.

Бібл. Бібл. 10, табл. 0, рис. 7.

Ключові слова: вуглець-вуглецевий матеріал, ВВКМ, теплоємність, теплопровідність, розрахунково-експериментальний метод.**Вступ**

Теплові випробування високотемпературних композиційних матеріалів і покриттів проводяться для оцінки їх теплозахисних властивостей і визначення теплофізичних характеристик (ТФХ). Однією з головних ТФХ теплозахисного матеріалу є теплопровідність. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) демонструють сильну залежність теплопровідності від температури. Для них є важливим напрям розповсюдження тепла зважаючи на певні схеми розташу-

вання вуглецевих волокон в матриці, що спричиняє відому для них анізотропію властивостей. Крім того, на теплопровідність ВВКМ-21 і теплозахисні властивості покриття з нього впливає інтенсивність і тривалість теплового впливу, окислювальні здатності навколишнього середовища (газового потоку) та його тиск на поверхню матеріалу. Тому найбільшу цінність мають ТФХ, що отримані в умовах, які імітують реальні.

В умовах пічного нагріву температура поверхні зразка, що нагрівається, складала $\sim 1000 \dots 1200 \text{ К}$. Для

більш високих температур в попередніх роботах ми застосовували кисень-пропановий пальник (до ~ 2300 K) та універсальний термоструменевий стенд (УТС), розроблений в ІПМ НАН України. Він дозволяє отримувати температури при струменевому нагріві до ~ 3300 K. Для досягнення такої температури застосовували повітряно-паливні та киснево-паливні пальники, які встановлені на УТС. Взагалі, УТС ІПМ НАН України може використовуватися для проведення експериментальних науково-дослідних та технологічних робіт з використанням термохімічних генераторів високошвидкісних високотемпературних газових потоків, у тому числі гетерофазних [1]. При цьому потрібно враховувати, що нагрівання до високих температур потребує захисту від окислення поверхні зразків з ВВКМ-21. Так в [2] показано, що термоерозійний знос ВВКМ-21 починає помітно проявлятися при температурах вище ~ 1300 K, при яких необхідне застосування захисних покриттів [3]. Наприклад, покриття $ZrB_2-15MoSi$ майже втричі зменшує швидкість лінійного зношування поверхні ВВКМ [3].

Мета роботи: визначити температурні залежності теплоємності і теплопровідності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 вздовж і поперек по відношенню до орієнтації вуглецевих волокон в інтервалі 1700 K.

Засоби випробувань зразків

Для вимірювання теплоємності використовувався стандартний прилад ІТ-с-400 [4]. Для пічного нагріву було застосовано модернізовану муфельну піч МП-80. Піч оснащена нагрівачами із фехралевого дроту загальною потужністю 2 кВт. Вони розташовані на її бічній поверхні. Автоматика печі виконана на базі терморегулятора UDS-220.R Pid-1345, призначеного для авто-

матичного регулювання температури об'єкта методом двопозиційного регулювання. Пристрій розрахований для роботи з термопарами типу ТХА (К), ТХК (L) до ~ 1370 K. Він забезпечує автоматичне утримання заданої температури в зоні нагріву. До складу керуючого модулю входить семистор з потужністю до 5 кВт. За допомогою нього підтримується температура у печі за встановленим значенням.

Температуру у печі та на зразках вимірювали термоелектричними перетворювачами (термопарами) типу (хромель-алюмель, діаметр дротів 0,3 мм). Для реєстрації температур застосовується аналоговий перетворювач АКОН-Т [5]. Він складається з адаптеру інтерфейсів WAD-RS-232/USB/485-BUS та двох чотирьох каналних модулів аналогового введення. Вони виконані з поканальною гальванічною розв'язкою вхідних каналів. Керування та налаштування системи реєстрації температур відбувається за допомогою штатної програми «АКОН-Адміністратор». Вона інсталюється, як звичайна програма на комп'ютері користувача. Програма дозволяє налаштувати потрібні канали для кожного типу термопар, відображати в режимі реального часу графіки показів з датчиків, підключених до перетворювача, записувати ці дані у файли та візуалізувати їх у графічному вигляді з раніше створених файлів.

Коефіцієнт теплопровідності ВВКМ-21 визначали за схемою, що зображена на рис. 1, а. Фото зразка наведено на рис 1, б.

Для визначення теплопровідності використовувався пакет із двох пластин, нагрітих ззовні газовим середовищем: повітрям на початку експерименту та сумішшю азоту, вуглекислого і чадного газу після окислення вуглецю. Для ізоляції внутрішніх поверхонь від розігрітого

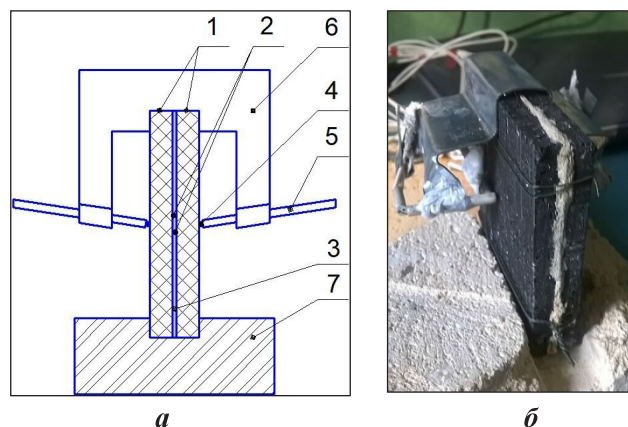


Рис. 1. Схема визначення коефіцієнта теплопровідності ВВКМ-21 (а) та фото зразка (б): 1 – зразок з двох пластин; 2 – дві внутрішні термопарі; 3 – прошарок асбокартону; 4 – зовнішні термопарі; 5 – чохла термопар; 6 – кріплення термопар; 7 – підставка

газу між пластинами розміщували прошарок азбокартону, а температури під час нагрівання фіксували термопарами на внутрішній 2 та зовнішній 4 поверхнях (рис. 1).

Визначення питомої теплоємності вуглець-вуглецевих матеріалів

Теплоємність ВВКМ-21 при температурах 300...800 К визначали в даній роботі експериментально на приладі ІТ-с-400 [4], а при температурах 300...1300 К – за допомогою програми «АСТРА 4.0» [7]. Слід зазначити, що експериментальна і розрахункова теплоємності ВВКМ-21 при відповідних температурах майже не відрізняється.

В основу алгоритму багатоцільового програмного комплексу «АСТРА 4.0» покладено універсальний термодинамічний метод визначення характеристик рівноваги довільних гетерогенних систем, заснований на фундаментальному принципі максимуму ентропії. Цей метод представляє унікальну можливість узагальненого опису будь-якого високотемпературного стану за допомогою тільки фундаментальних законів термодинаміки, незалежно від умов і способів досягнення рівноваги. Метод вимагає мінімальної інформації про саму систему і про її оточення. Основу інформації в базі даних складають термодинамічні, теплофізичні і термохімічні властивості індивідуальних речовин.

Більша частина необхідних відомостей для неї зібрана в матеріалах Національного бюро стандартів США [7]. Решта – отримана з опублікованих у періодичній пресі, монографіях і довідниках.

Температурні криві питомої теплоємності для вуглецевих матеріалів типу ВВКМ наведені на рис. 2.

Визначення коефіцієнта теплопровідності

Початкове значення коефіцієнту теплопровідності ВВКМ-21 на першому ітераційному кроці моделювання було прийнято рівним 100 Вт/(м•К), яке відповідає середньому коефіцієнту теплопровідності графіту при температурах 200...1000 К.

Відомо, що коефіцієнт теплопровідності композиційних матеріалів залежить від структури матеріалу, орієнтації напрямку градієнту температури відносно схеми розташування вуглецевих волокон в матриці, темпу нагрівання, тощо. Тому стандартний прилад ІТ-λ-400 [4], в якому відбувається об'ємне нагрівання з невеликою швидкістю 5 град/хв, не може забезпечити отримання значення теплопровідності, що відповідають експлуатаційним умовам. Коефіцієнт теплопровідності, який значно ближче відповідає робочим умовам, повинен бути визначений при високотемпературному однобічному нагріванні зі швидкостями, що набагато перевищують можливості приладу ІТ-λ-400.

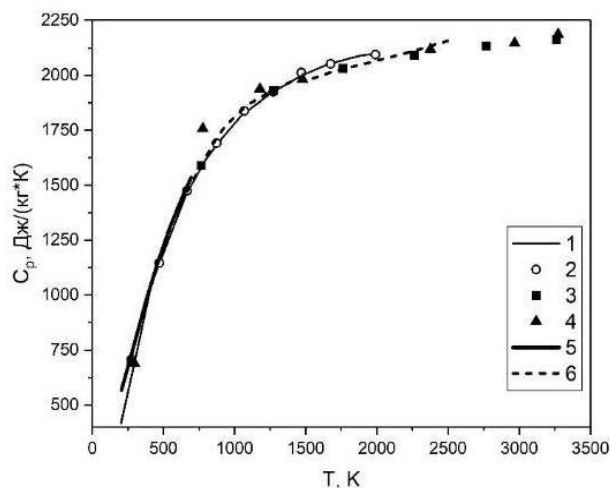


Рис. 2. Залежності питомої теплоємності вуглецевих матеріалів від температури:

- 1– ВВКМ (апроксимація поліномом 200...2000 К) 2– дрібнозернистий (кристалічний) графіт МПГ-6 (довідкові дані) (200...1700 К) [8]. 3– ВВКМ КІМФО-МБ (експериментальні дані) з Баз даних ІПМ НАНУ (300...3270 К); 4– ВВКМ УПА-3 (експериментальні дані) з Баз даних ІПМ НАНУ (300...3270 К); 5– експериментальні дані для досліджуваного матеріалу ВВКМ-21, отримані на ІТ-с-400 (570...670 К); 6– вуглець (дані термодинамічного розрахунку з використанням ПЗ «АСТРА 4.0»)

Блок ВВКМ-21 із взаємно перпендикулярною орієнтацією волокон в площині ХУ був використаний для виготовлення 6 зразків у вигляді пластин з розмірами 60×60×6 мм для дослідження температурних полів у двох напрямках – перпендикулярно площинам ХУ і ХZ (рис. 3). Частину зразків маркували ХУ (напрямок розповсюдження тепла співпадає з віссю Z), інші зразки маркували ХZ (напрямок розповсюдження тепла співпадає з віссю Y).

Експерименти проводилися в умовах пічного нагріву в модернізованій муфельній печі МП-80.

Методика визначення теплопровідності ВВКМ-21 у заданому температурному діапазоні базується на комп'ютерному моделюванні теплового стану зразків та подальшому розрахунку залежності коефіцієнта теплопровідності від температури методом зворотних задач [9]. Для цього використовували експериментальні дані температур на гарячій (1) та внутрішній (2) поверхнях зразка (рис. 1). Початкова температура зразка T_0 задає початкову умову, а в якості граничних умов прийняті: експериментальна залежність температури нагрітої поверхні від часу та теплоізоляція внутрішньої поверхні. Індикаторна температура внутрішньої поверхні слугує для розрахунку квадратичної похибки між нарахованою та експериментальною температурами. Модель однобічного нагрівання нескінченної теплоізолюваної пластини (1) застосовується для визначення коефіцієнта теплопровідності ВВКМ-21 в умовах пічного нагріву до 1200 К:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x \in (0, L), t \in (0, t_{\text{end}}) \quad (1)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c},$$

де a – температуропровідність; λ – коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури;

ρ – щільність; c – теплоємність; L – товщина пластини; t_{end} – час випробувань;

граничні умови: $(0, t)=0, t \in (0, t_{\text{end}}), T(L, t)=0, t \in (0, t_{\text{end}})$, початкова умова: $T(x, 0) = T_0$ – початкова температура зразка.

Визначення коефіцієнта теплопровідності у рівнянні (1) проводили пошуком такої його залежності від температури, для якої середньоквадратичне відхилення F в (2) розрахункових температур $T_M(l, t)$ у моделі (2) та експериментальних значень температур $T_Y(l, t)$ було мінімальним [9].

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{M,j} - T_{Y,j})^2}{m}} \approx \delta, \quad (2)$$

де m – число експериментальних вимірів, що використані для вирішення зворотної задачі; δ – середньоквадратична похибка вимірювання температури $T(L, t)$.

Для розрахунку також необхідне знання густини зразка $\rho_0(T)$ та залежності його питомої теплоємності від температури $C_p(T)$. Зазначений набір даних дозволяє однозначно визначити залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу, що вивчається, у діапазоні температур: від початкової до максимально досягнутої на поверхні зразка.

Таким чином, в експерименті були забезпечені однобічне нагрівання поверхні пластини зразка однорідним тепловим потоком та теплоізоляція її холодної поверхні з вимірюваннями температур обох поверхонь у процесі нагрівання. Виконання цих умов при пічному нагріванні пакету з двох пластин зразків



а



б

Рис. 3. Зразки ВВКМ-21 з орієнтацією ХУ(а) та ХZ(б) до випробувань

дозволяє повністю виключити теплові втрати з їх холодних (внутрішніх) поверхонь, див. рис. 1.

Важливо зазначити, що розрахунок проводили за припущеннями:

1) матеріал не зазнає фізико-хімічних змін у діапазоні досліджуваних температур, а після охолодження теплофізичні властивості залишаються незмінними;

2) температурне розширення і відповідне зниження щільності матеріалу мають незначний вплив на теплопровідність і тому не враховуються;

3) поверхневе окислення матеріалу при нагріванні в повітряному середовищі також відсутнє;

4) структура матеріалу в межах одного зразка однорідна, тобто має однакові теплофізичні властивості.

Модель, що задовольняє вказаним умовам, може бути реалізована в будь-якому доступному користувачеві програмному комплексі, що забезпечує вирішення диференціальних рівнянь у часткових похідних (ANSYS, SIMULIA, COMSOL [10]).

Типові значення отриманих похибок наступні: $\pm 1^\circ$ до ~ 300 К, $\pm 2^\circ$ до ~ 900 К, $\pm 5^\circ$ до ~ 1300 К і $\pm 10^\circ$ при температурах понад 1300 К.

На рис. 4 показаний зовнішній вигляд зразків ВВКМ-21 після випробувань

З метою перевірки одновимірності характеру розподілу температури по товщині зразка виконані тестові розрахунки для зразків у вигляді квадратних пластин з шириною, що на порядок перевищує товщину. Виявлено, що навіть, в умовах відсутності теплової ізоляції бічних граней зразка, він демонструє одновимірний характер розподілу температури в центральній своїй частині. Прикладом цього є отримані розрахункові температурні поля для зразка у формі диска діаметром 60 мм та товщиною 6 мм при пічному нагріванні при температурі печі ~ 1300 К (рис. 5).

В центральній частині диска (приблизно до половини його радіусу) температурне поле в диску з площиною, що нагрівається, практично не відрізняється від поля в диску з ізольованою площиною (рис. 5). Це дозволяє рахувати одновимірним розподіл температури в центральній частині зразка протягом всього часу нагріву. У цьому випадку похибка визначення коефіцієнта теплопровідності визначається виключно точністю вимірювання і реєстрації температур гарячої та холодної поверхонь пластини в її центральній зоні.

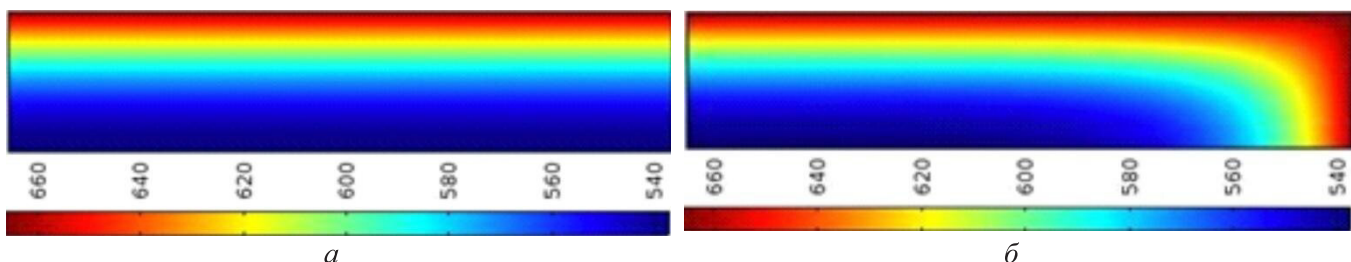


а



б

Рис. 4. Зразки ВВКМ-21 з орієнтацією XY(а) та XZ(б) після випробувань



а

б

Рис. 5. Температурні поля при одnobічному нагріванні диска з ВВКМ-21 діаметром 60 мм (лівий край зображення $R=0$, правий $R=30$ мм): а – теплоізольована нижня та бічна поверхня диска, 50 с нагрівання; б – теплоізольована нижня поверхня диска, нагрівання бокової поверхні за тим же законом, що і верхня, 50 с нагрівання

Приклади телеметрії, яку реєстрували під час проведення експериментів по нагріву у печі зразків матеріалу ВВКМ-21 різної орієнтації наведені на рис. 6.

Залежності коефіцієнтів теплопровідності для різних орієнтацій вуглецевих волокон наведені на рис. 7. З них можна бачити, що зразки з орієнтацією XY із зростанням температури демонструють збільшення коефіцієнту теплопровідності, а з орієнтацією XZ демонструють спочатку його зменшення до ~ 650 K, а

потім коефіцієнт теплопровідності поступово росте майже лінійно. Це картина типова для анізотропних матеріалів. Раніше (в частині «Визначення коефіцієнта теплопровідності») ми відзначали, що викладену методику можна застосовувати, якщо не порушено 4 умови. У нашому випадку для зразків з орієнтацією XZ за час нагрівання протягом 250 с спостерігається сильна зміна зовнішнього вигляду їх поверхні (див. рис. 3 і 4). Так як окислення матеріалів на основі вуглецю починається

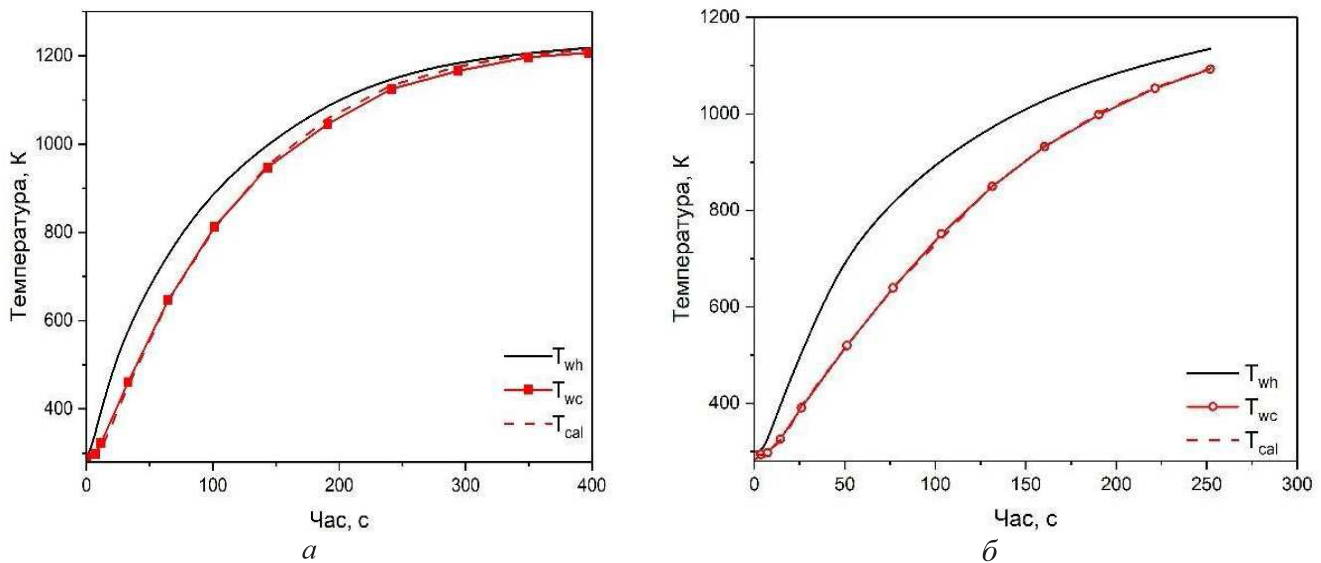


Рис. 6. Залежності температури від часу при нагріванні в печі для зразків ВВКМ-21 орієнтацій а – XY та б – XZ: T_{wh} – температура на зовнішній поверхні зразка; T_{wc} – температура на внутрішній поверхні зразка; T_{cal} – розрахункова температура

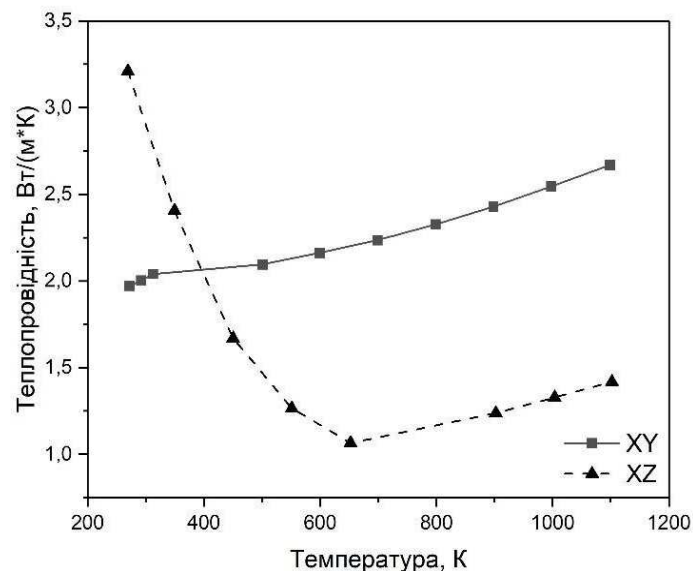


Рис. 7. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для матеріалу ВВКМ-21 з орієнтацією: XY та XZ

з ~ 1000 К, а тривалість нагріву становить приблизно 300с, то не виконується перша та третя умови. Для зразків з орієнтацією XZ після окислення матриці (на рис. 4 залишаються тільки вуглецеві волокна) функція коефіцієнта теплопровідності стає майже лінійною.

Висновки

1. Отримана залежність питомої теплоємності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 при даних умовах випробувань добре співпадає з відомими результатами подібних матеріалів.

2. Використаний в роботі розрахунково-експериментальний метод, який поєднує температурні вимірювання, моделювання теплового стану зразків і метод зворотних задач, дозволив в інтервалі температур до 1200 К отримати залежності теплопровідності вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 від температури для орієнтацій вздовж волокон в діапазоні $1,9 \div 2,7$ Вт/(м·К) і поперек – в діапазоні $3,2 \div 1,3$ Вт/(м·К).

3. Подальші дослідження плануються з використанням термоструменевого стенду ІІМ НАН України для визначення теплопровідності ВВКМ-21 до 3300 К при різних схемах розташування і орієнтації волокон.

ЛІТЕРАТУРА

1. Евдокименко, Ю. И. Горелочное устройство двухкаскдной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов, С. В. Бучаков // Вісник двигунобудування. – 2015. – №2. – С. 143-148. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2015_2_27.
2. Borovyk, D. Determination of the thermophysical characteristics of composite materials at high temperatures [Text] / D. Borovyk, Y. Yevdokymenko, G. Frolov // Aerospace Technic and Technology. – 2024. – Vol. 0, № 4sup1. – P. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup1.13>.
3. Фролов, Г. А. Результаты испытаний покрытий на основе диборида циркония на углерод-углеродных подложках для тепловой защиты изделий ракетно-космической техники [Текст] / Г. А. Фролов, Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, С. В. Бучаков // Вісник двигунобудування. – 2018. – №2. – С. 186-195. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2018_2_29.
4. Волков, Д. П. Приборы и методы для измерения теплофизических свойств веществ [Текст] / Д. П. Волков, В. А. Кораблев, Ю. П. Заричняк. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 66 с. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/92.pdf>.
5. Техническое описание WAD-AIK12-BUS TY U 33.2-33056998-001:2009 [Электронный ресурс] / АКОН. – 2015. – Режим доступа: https://www.akon.com.ua/download/products/teh_op/teh_op
6. Синярев, Г. Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов [Текст] / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 263 с. – Режим доступа: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/31983>.
7. JANAF Thermochemical tables: 2nd edition [Text]. – NSRDS-NBS 37. – Washington: US Gov. Print. Office, 1971. – 1141 p. – Available at: <https://srds.nist.gov/NSRDS/NSRDS-NBS37.pdf>.
8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники [Текст] / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат. – 1967. – 474 с.
9. Круковский, П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) [Текст] / П. Г. Круковский. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.
10. Pryor, R. W. Multiphysics Modeling Using Comsol V.4: A First Principles Approach [Text] / R. W. Pryor. – Mercury Learning & Information; HAR/DVD edition, 2011. – 700 p. – Available at: <https://dl.poweren.ir/downloads/PowerEn/Book/2019/.pdf>.

DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CARBON-CARBON MATERIALS BY A COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL METHOD

D.V. Borovyk¹, Yu.I. Yevdokymenko²,
P.G. Krukovsky³, G.O. Frolov¹, D.I. Skliarenko⁵

¹*Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, scientific, orcid.org/0000-0003-4668-3778, e-mail: dmitryb2007@gmail.com*

²*Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, scientific, orcid.org/0000-0002-3344-798X, e-mail: yevd@meta.ua*

³*Dr. Sci. (Engin.), 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*

⁴*Dr. Sci. (Engin.), Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, Head of Laboratory of materials of aerospace technology of IPMS NASU of I.M. Frantsevich, orcid.org/0000-0001-7045-310X, e-mail: g_frolov@ipms.kyiv.ua*

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, Junior Research Associate, orcid.org/0000-0002-0431-2111, e-mail: cklyr90@bigmir.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.4>

The continuous improvement of thermal protection efficiency for rocket and space technology (RST) components is a key aspect of progress in this field. Today, carbon-carbon composite materials (CCCM) are increasingly becoming the standard in thermal protection systems. Simultaneously, CCCMs are being used more frequently in devices for testing RST materials and evaluating component durability. For instance, CCCMs serve as structural and heating elements in vacuum furnaces under high mechanical and thermal loads. The expanding application of such materials requires

enhancements to existing methods and the development of new approaches for studying and determining their thermophysical properties. This paper addresses this need by investigating heat propagation in flat CCCM samples with different fiber orientations in the matrix using a combined experimental-computational method to determine their heat capacity and thermal conductivity in the temperature range of 300–1200 K. The study involved furnace heating of CCCM samples, with the selected temperature range justified by the onset of thermoerosion at 1200 K for CCCMs. Temperatures up to 1200 K with heating durations of up to 60 seconds typically do not cause significant surface degradation. Heat capacity was determined at temperatures up to 700 K using the IT-c-400 device and calculated up to 2000 K using the «ASTRA 4.0» software. Thermal conductivity was obtained through a computational-experimental approach, employing a heat conduction model and an inverse problem methodology. Experimental temperatures from two surfaces of a flat sample during one-sided heating were used to solve the inverse problem. The COMSOL Multiphysics® software package, an integrated platform for modeling physical processes (including heat transfer) in environments and objects of various geometries, was employed for the calculations.

References 10, tables 0, figures 7.

Key words: carbon-carbon composite material, CCCM, heat capacity, thermal conductivity, calculation and experimental method.

1. Yevdokymenko, Yu.I., Kysel, V.M., Frolov, H.A., Buchakov, S.V. Horelochne ustroistvo dvuhkaskadnoi konfiguratsii dlya vysokoskorostnogo vozdušno-toplivnogo napyleniya na zhydkom toplyve [Burner Device of a Two-stage Configuration for High-speed Air-fuel Spraying on Liquid Fuel]. *Visnyk dvynhunobuduvannya*, 2015, No. 2, pp. 143-148. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2015_2_27 (in Ukr.)

2. Borovyk, D., Yevdokymenko, Yu., Frolov, G. Determination of the thermophysical characteristics of composite materials at high temperatures. *Aerospace Technic and Technology*, 2024, Vol. 0, No. 4sup1, pp. 89-99. doi:10.32620/akt.2024.4sup1.13

3. Frolov, H.A., Yevdokymenko, Yu.I., Kysel, V.M., Buchakov, S.V. Rezultaty ispytaniy pokrytii na osnove dyboryda tsirkoniya na uglerod-uglerodnykh podlozhkakh dlya teplovoi zashchity izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Test Results of Zirconium Diboride-based Coatings on Carbon-carbon Substrates for Aerospace Thermal Protection]. *Visnyk dvynhunobuduvannya*, 2018, No. 2, pp. 186-195. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2018_2_29 (in Ukr.)

4. Volkov, D.P., Korablev, V.A., Zarichnyak, Yu.P. *Pribory i metody dlya izmereniya teplofizicheskikh svoistv veshchestv* [Instruments and Methods for Measuring the Thermophysical Properties of Substances]. Metod. ukaz. St. Petersburg: SPb GU ITMO, 2006, 66 p. Available: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/92.pdf> (in Rus.)
5. *Tekhnicheskoe opisanie WAD-AIK12-BUSTU U 33.2-33056998-001:2009 AKON* [Technical Description WAD-AIK12-BUS TU U 33.2-33056998-001:2009 AKON]. Akon, 2015. [Electronic resource]. Available: https://www.akon.com.ua/download/products/teh_op/teh_op (in Ukr.)
6. Syniaren, H.B., Vatolin, N.A., Trusov, B.H., Moiseev, H.K. *Primeneniye EVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov* [Application of Computers for Thermodynamic Calculations of Metallurgical Processes]. Moscow: Nauka, 1982, 263 p. Available: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/31983> (in Rus.)
7. JANAF Thermochemical tables: 2nd edition. NSRDS-NBS 37. Washington: US Gov.Print.Office, 1971, 1141 p. Available: <https://srd.nist.gov/NSRDS/NSRDS-NBS37.pdf>
8. Chirkin, V.S. *Teplofizicheskie svoistva materialov yadernoi tekhniki* [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow: Atomizdat, 1967, 474 p. (in Rus.)
9. Krukovsky, P.H. *Obratnye zadachi teplomassoperenosa (obshchii inzhenernyi podkhod)* [Inverse Problems of Heat and Mass Transfer (General Engineering Approach)]. Kyiv: Institute of Technical Thermophysics, NAS of Ukraine, 1996, 218 p.
10. Pryor, R.W. *Multiphysics Modeling Using Comsol V.4: A First Principles Approach*. Mercury Learning & Information; HAR/DVD edition, 2011, p. 700. Available: <https://dl.poweren.ir/downloads/PowerEn/Book/2019/.pdf>

Отримано 04.11.2024

Received 04.11.2024

Прийнято до друку 14.11.2024

Accepted for publication 14.11.2024

УДК 66.047

КІНЕТИКА СУШІННЯ КРАПЕЛЬ РОЗЧИНІВ СИРОВАТКОВОГО БІЛКУ ЯК СТРУКТУРОУТВОРЮЮЧОГО КОМПОНЕНТУ ДЛЯ ФРУКТОВО- І ЯГІДНО-БІЛКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ

Турчина Т.Я.¹, канд. техн. наук, Авдєєва Л.Ю.², докт. техн. наук,
Макаренко А.А.³, канд. техн. наук, Декуша Г.В.⁴, канд. техн. наук

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

¹ст. наук. співр., старш. наук. співр. tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²пров. наук. співр., ст.. наук. співр. tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

⁴ст. наук. співр., старш. докл., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-8829-8221>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.5>

В статті досліджено кінетику сушіння розчинів сироваткового білку у системі «крапля – паро-газове середовище». Встановлено, що більший вміст сухих речовин (10%) скорочує час сушіння крапель на 15% при підвищенні температури теплоносія від 140°C до 180°C. Основним чинником, що впливає на ефективність сушіння, є вміст сухих речовин. При цьому білки висушуються до сипкого порошку з низькою кінцевою вологістю.

The article investigates the drying kinetics of whey protein solutions in the "drop-vapor-gas medium" system. It was found that a higher content of dry substances (10%) reduces the drying time of droplets by 15% when the heat carrier temperature is increased from 140°C to 180°C. The main factor influencing drying efficiency is the dry matter content. Proteins dry into a free-flowing powder with low final moisture content.

Бібл. 15, рис. 5.

Ключові слова: крапля, розчин, сироваткові білки, температура теплоносія, кінетика сушіння.

Постановка проблеми. Білок - це життєво важлива поживна речовина, яка необхідна не тільки для створення, підтримки і відновлення тканин, клітин і органів по всьому організму людини, а й для сприяння енергетичному обміну і клітинним процесам, захисту організму від хвороб шляхом коригування його імунної системи. Білки як незамінні високомолекулярні органічні речовини, що входять до складу клітин як зовнішніх структур (шкіри, волосся, нігтів), так і усіх внутрішніх органів, є найбільш поширеним сполуками в тілі людини після води, без яких існування людського організму неможливе і вимагає ретельного стеження за достатньою їх кількістю в раціоні харчування[1].

Для людей підвищених фізичних або екстремальних навантажень (військових, спортсменів, альпіністів, водолазів та ін.), тяжкохворих або важкопоранених в умовах активних бойових дій (прооперованих, понівечених і т.д.) споживання високобілкових продуктів і напоїв як складових комплексної терапії достатньо актуальне і край необхідне, оскільки сприяє швидкому відновленню і одужанню.

У зв'язку з цим створення продуктів оздоровчого і функціонального призначення з натуральної плодової сировини, якої в Україні вистачає, та білків підсирної сироватки вітчизняного виробництва набуває, на наш погляд, стратегічного значення і вимагає додаткових досліджень для визначення кінетики їх сушіння та переваг такого взаємозбагачувального поєднання в композиціях як об'єктів розпилювального сушіння[1,2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Всі білки - це полімери, мономерами яких є амінокислоти. В основному вони складаються з вуглецю, водню, кисню та азоту. У складі більшості досліджених білків всіх живих організмів було виявлено 20 амінокислот, що беруть участь в їх побудові[1, 3-5].

Білки (протеїни, поліпептиди) як головний будівельний матеріал в утворенні клітин, тканин і м'язів виконує ще й масу інших задач з підтримки життєдіяльності організму. Брак білку в раціоні викликає слабкість, запаморочення, безсоння, тривожний стан, депресію, в'ялість, зниження імунітету і опірності

різним вірусам та інфекціям, а в дітей і людей старшого віку – зниження мозкової діяльності і порушення діяльності деяких систем організму, зокрема, нервової. Тому, для уникнення ускладнень у стані здоров'я присутність білка в раціоні людини обов'язкова: щоденне споживання має становити 0,8-1,0г/кг ваги людини. При важких фізичних навантаженнях або заняттях силовими видами спорту кількість його як основного джерела росту і відновлення м'язів збільшується до 1,5-2.0г/кг ваги. При цьому треба врахувати, що не всі білки сприймаються організмом однаково і перетравлюються з однаковою швидкістю. Наприклад, яловичий білок перетравлюється швидко, проте засвоюється тільки 70% його корисних речовин. Сироватковий білок теж має швидку засвоюваність, при цьому організм сприймає його практично повністю – 90% від спожитої кількості [3].

Концентрат сироваткових білків (КСБ) має функціональні і оздоровчі властивості. Його біологічна цінність вище за інші білки. Продукт має високий вміст незамінних амінокислот, які сприяють синтезу м'язового білка. Основу КСБ складають сироваткові білки: бета-лактоглобулін, альфа-лактальбумін, альбумін сироватки крові, імуноглобуліни та компоненти протеозапептонної фракції. Концентрат сироватковий білковий, отриманий з молочної підсирної сироватки шляхом концентрування сироваткових білків з використанням методу ультрафільтрації («КСБ-УФ»), широко використовується як добавка у виготовленні харчових продуктів та продуктів дитячого харчування.

Використовуючи діафільтрацію, отримують КСБ з вмістом білка 80% від загальної маси сухих речовин. Поєднання мембранних методів обробки молочної сироватки дозволяє отримувати молочно-білкові концентрати з необхідними властивостями, вуглеводами і мінеральним складом. За схемою: ультрафільтрація – діафільтрація – електродіаліз можна виробляти концентрати з 90-95%-м вмістом і більше сироваткових білків з мінімальним вмістом лактози (0,5%) і мінеральних речовин (<0,3%). Застосування мембранних методів дозволяє виділяти сироваткові білки в нативному вигляді без використання хімічних реагентів та інших допоміжних вартісних матеріалів [6], що свідчить про доцільність використання такого продукту як носія і структуроутворювача у композиціях з плодовими сировинними матеріалами.

Завдяки багатofункціональності, у т.ч. структуроутворюючим та термозахисним властивостям, білки молочної сироватки користуються попитом в якості

носія та інкапсулюючого засобу при розпилювальному сушінні термолабільних пробіотичних препаратів та харчових продуктів. Поєднання у деяких випадках сироваткових білків з мальтодекстрином сприяло одержанню значно більшому відсотку життєздатних живих організмів у висушеному в інкапсульованій формі порошку пробіотика і кращій його функціональності після висушування, підвищенню показників його розчинності та змочуваності [7].

Досвід заміни мальтодекстрину в композиціях з плодовою сировиною навіть на незначний відсоток (від 0,5-1,0% за сухими речовинами) ізоляту сироваткового білку показав, як це сприяє зменшенню поверхневого натягу полуничного поре, більшій міцності і монолітності висушених часток і зменшенню їх розмірів і, як результат, підвищенню ефективності висушування, більшому виходу порошку з камери та покращенню його якісних характеристик [8].

Враховуючи низьку температуру склопереходу цукрів, що містяться у плодовій сировині, і схильність їх до утворення пластичних мас на поверхні камери розпилювальної сушарки, що зменшує вихід порошку і погіршує його якість, досліджено вплив білкових та вуглеводних добавок на вихід порошку та його фізичні властивості. Показано, що ізолят молочного білка як матеріал-носіє є більш ефективним відповідно до виходу продукту з сушарки в менших співвідношеннях з плодовою сировиною, ніж матеріали-носії на основі вуглеводів. [9]

Ринок сироваткових білків в Україні представлений широким асортиментом сухих концентратів, одержаних з застосування ультрафільтрації та сушіння, які добре розчиняються у воді, молоці, соках під час приготування коктейлів різноманітних смаків. До таких спеціальних білкових продуктів належать:

- **КСБ-УФ-65** - один з базових швидко засвоюваних білків (засвоюється організмом протягом години) використовуваних, як в чистому вигляді, так і в складних комплексних сумішах (міксах) з різним процентним його змістом;

- Біос (Техмолпром) **КСБ УФ 65%, КСБ УФ 70%** (м. Гадяч, Полтавська обл., Україна) – не поступається своїм іноземним аналогам. КСБ 65% відноситься до "швидких" протеїнів. Виробляється без добавок, зі смаком клубники, ванілі, банану, шоколаду, лісових ягід, карамелі [11, 12];

- **ProtéAlpine 80** (Франція) - концентрат савойського походження з сироватки, отриманої при виробництві двох якісних сирів: AOP Beaufort і IGP

Tomme de Savoie, без добавок. Порошок завдяки низько-температурному процесу містить неденатурированні білки, багаті розгалуженими амінокислотами [13];

- **КСБ/WPC 80** – застосовується в харчовій промисловості, зокрема, підходить для дитячого, спортивного і медичного харчування [11];

- **Протеїнові коктейлі для спортсменів**, розроблені на основі КСБ та мальтодекстрину в залежності від часу їх прийому мають відповідні назви: «Ранковий», «Перед-треніровочник», «Післятрені-ровочник», «Швидкий перекус» та «На ніч» і т.д.

Наведені дані свідчать про доцільність розширення асортименту порошкової форми відновлювальних продуктів (протеїнових коктейлів, батончиків, морозива або десертів) спеціального оздоровчого і функціонального призначення для різних верств населення, і, в першу чергу, військових, спортсменів, тяжкопоранених та ін., на основі КСБ-УФ і натуральної плодової сировини. Для одержання таких продуктів методом розпилювального сушіння важливо володіти знаннями кінетичних закономірностей сушіння крапель розчинів сироваткового білку як носія у складі фруктово- та ягідно-білкових композицій.

Мета роботи полягала у проведенні досліджень кінетики зневоднення одиничних крапель розчинів сироваткового білку у системі «крапля – парогазове середовище» у потоці нагрітого теплоносія.

Матеріали і методи роботи. У дослідження використовувались розчини з вмістом сухих речовин 5% та 10%, які виготовлялись шляхом розчинення у воді порошкового концентрату сироваткового білка після ультрафільтрації (КСБ-УФ) згідно з ДСТУ 4458:2005.

Концентрати білкові молочні. Технічні умови.

Дослідження проводились на експериментальному стенді з вивчення процесу сушіння одиничних крапель розміром $\approx 1,5$ мм рідинних систем у потоці нагрітого теплоносія [15.]

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. На рис. 1 наведені термограми зневоднення одиничних крапель розчинів сироваткових білків з $C_o = 5\%$ і 10% при температурі теплоносія $T_n = 140, 160$ та 180°C .

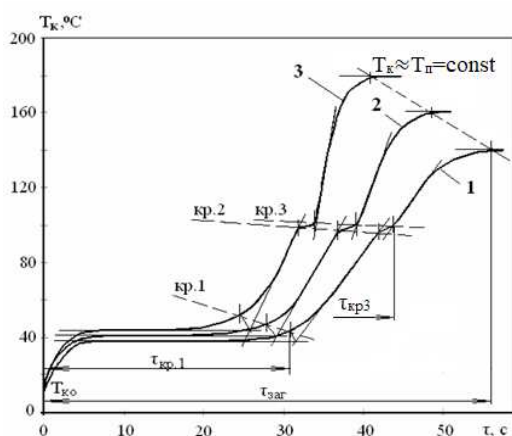
Процес зневоднення крапель КСБ обох розчинів, окрім крапель 10%-го розчину при $T_n = 180^\circ\text{C}$, відбувається, як видно з термограм сушіння (рис. 1), у два періоди:

1. *випарювальному*, який включає стадію прогрівання краплі на початку процесу зневоднення та стадію випаровування вологи з вільної поверхні при температурі краплі, що відповідає температурі «вологого» термометру: $T_k = 38-42^\circ\text{C}$ ($T_n = 140^\circ\text{C}$); $40-44^\circ\text{C}$ (160°C) і $42-47^\circ\text{C}$ (180°C).

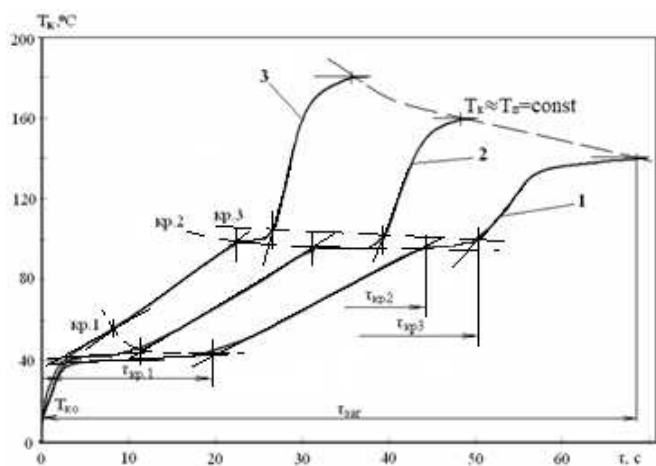
2. *сушильному*, який складається з трьох стадій:

- *стадії кіркоутворення*, виділеної на термограмах сингулярними крапками кр.1 та кр.2, яка протікає за умов зростання температури краплі, викликане виділенням на її поверхні зародків сухої фази, площа якої поступово нарощується по всій поверхні до утворення суцільної кірочки;

- *стадії кипіння*, виділеної на термограмах сингулярними крапками кр.2 та кр.3, коли температура краплі досягає температури кипіння розчину (води) під утвореною кірочкою при температурі 100°C ; у зв'язку з надто коротким у часі перебігом даної стадії вплив темпера-



а)



б)

Рис. 1. Термограми зневоднення крапель розчинів підсирної сироватки з вмістом сухих речовин C_o :

а) 5 % і б) 10% при температурі теплоносія T_n : 1 – 140°C ; 2 – 160°C ; 3 – 180°C

турних режимів або показників C_0 на її тривалість у даних дослідженнях окремо не розглядався;

- *стадії досушування*, яка протікає від сингулярної крапки кр.3 на термограмах і до виходу температури краплі на рівень температури теплоносія $T_{\kappa} \approx T_{\pi} = \text{const}$, що є ознакою завершеності процесу зневоднення.

Для 10%-го розчину КСБ характер термограм, як видно на рис.1 (б), істотно змінився. Якщо при менших з досліджених температур випарювальний період на термограмах присутній, хоча і скоротився при $T_{\pi}=140^{\circ}\text{C}$ до 37% від загального часу зневоднення і при $T_{\pi}=160^{\circ}\text{C}$ до 21%, то при $T_{\pi}=180^{\circ}\text{C}$ він відсутній взагалі. Тобто одразу після короточасного прогрівання краплі (крива 3, рис. 1, б) починається стадія кіркоутворення, що пов'язано з більш інтенсивним виділенням сухої фази на її поверхні.

За результатами цифрової обробки термограм зневоднення крапель даних розчинів КСБ (рис.1) були побудовані наступні кінетичні залежності від температури теплоносія:

- відносної тривалості випарювального періоду $\tau_{\text{кр1}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (рис. 2);
- темпу нагрівання крапель у стадії кіркоутворення $(dT/dt)_{\text{кірк}} = f(T_{\pi})$ (рис. 3, а);
- темпу нагрівання крапель у стадії досушування $(dT/dt)_{\text{в}} = f(T_{\pi})$ (рис. 3, б);
- відносної тривалості зневоднення до крапки кр.3. $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (рис. 4, а);
- відносної тривалості стадії досушування $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (рис. 4, б);

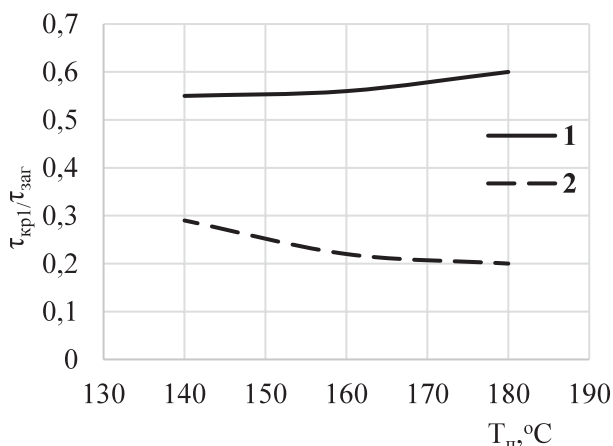


Рис. 2. Кінетичні залежності відносної тривалості випарювального періоду від температури теплоносія для крапель розчинів КСБ з C_0 : 1 – 5%; 2 – 10%

- загального часу зневоднення крапель розчинів білків сироватки (рис. 5).

За кінетичними залежностями (рис. 2) для 5%-го розчину КСБ випарювальний період в залежності від температурних умов складає 55-60% від загального часу зневоднення, що характерно для високовологих розчинів. Для 10%-го розчину КСБ характерне суттєве скорочення відносної тривалості випарювального періоду у порівнянні з 5%-м розчином: при $T_{\pi}=140^{\circ}\text{C}$ – на майже 30%; при 160°C – вже у 2,5 рази, а при 180°C – у 3 рази, що пов'язано з пришвидшенням процесу утворення сухої фази на поверхні крапель під впливом більш високих температур теплоносія.

Як видно з кінетичних кривих $(dT/dt)_{\text{кірк}} = f(T_{\pi})$ (рис. 3, а), темп нагрівання крапель 5%-го розчину білків сироватки (крива 1) у стадії кіркоутворення був у 3 рази вищий за темп нагрівання крапель 10%-го розчину (крива 2), а з підвищенням температури теплоносія від 140°C до 180°C – збільшився на 40%. Зазначене підвищення температури теплоносія не мало суттєвого впливу, як видно з того ж рис. 3 (а), на темп нагрівання крапель 10%-го розчину білків сироватки (крива 2) на цій самій стадії зневоднення: значення $(dT/dt)_{\text{кірк}}$ збільшилось лише на 17%.

Суттєве зниження темпу прогрівання крапель 10%-го розчину КСБ у стадії кіркоутворення (крива 2, рис. 3, а), а також у стадії досушування: на 16% при $T_{\pi}=160^{\circ}\text{C}$ та на 27% при $T_{\pi}=180^{\circ}\text{C}$, як видно з кінетичних кривих $(dT/dt)_{\text{в}} = f(T_{\pi})$ (крива 2, рис. 3, б), за умов дещо більшої відносної тривалості стадії досушування у порівнянні з 5%-м розчином, як видно з кривих $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (крива 2, рис. 4, б) сприяє зниженню термічного впливу на матеріал, що висушується. Цей позитивним результатом як аргумент отримання порошкових продуктів високої якості методом розпилювального сушіння доцільно враховувати при створенні композицій з білків КСБ у поєднанні з фруктовими та ягідними сировинними матеріалами, що містять велику кількість термолабільних біоактивних речовин.

Виходячи з кінетичних залежностей $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (рис. 4, а), показники відносної тривалості зневоднення крапель 5%-го та 10%-го розчинів КСБ до крапки кр.3 доволі близькі, достатньо високі і, зокрема, при $T_{\pi}=160-180^{\circ}\text{C}$ складають в межах $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} \geq 0,8$. Такі високі показники $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}}$ характерні для рідких високовологих продуктів, які проявляють здатність до висушування до стану порошку низької кінцевої вологості і тривалого терміну зберігання. Підтвердження тому можуть бути, як видно з кінетичних залежностей $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\pi})$ (рис. 4, б),

показники відносної тривалості стадії досушування для обох розчинів КСБ, які доволі близькі і за тих самих температур $T_n = 160-180^\circ\text{C}$ складають $\tau_v/\tau_{\text{заг}} \approx 0,2$.

Як видно з кривих $\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$ (рис. 5), збільшення темпу нагрівання крапель розчинів обох концентрацій у стадії досушування при підвищенні температури теплоносія від 140°C до 180°C (рис. 3. б) сприяло зменшенню загального часу їх зневоднення. Проте, підвищення температури теплоносія більш суттєво вплинуло на ефективність зневоднення крапель 10%-го розчину сироваткового білку, про що свідчать доволі високий відсоток тривалості зневоднення до крапки кр.3 при $T_n = 160-180^\circ\text{C}$ ($\approx 80\%$), як вказувалось вище (крива 2, рис. 4, а), в результаті чого загальний час їх зневоднення скоротився на 45%, а 5%-го розчину КСБ – лише на 27%.

Виходячи з цього можна зробити висновок, що при розпилювальному сушінні фруктових або ягідно-білкових композицій за більшого вмісту сироваткових білків у їх складі ($\geq 50\%$ за С.Р.) саме цей додатковий час - до 15% від тзаг, як показано вище ($\tau_{\text{заг}} = 35\text{с.}$ - 10%-й і $\tau_{\text{заг}} = 41\text{с.}$ - 5%-й розчин КСБ при $T_n = 180^\circ\text{C}$, рис. 5), дає потенційну можливість для покращення умов їх сушіння методом розпилювання і одержання високоякісних порошків низької кінцевої вологості, що сприятиме подовженню терміну їх зберігання у сипкому стані.

Дослідження фізичного стану висушених крапель (часток) проводились за допомогою тонкого металевого шупа у потоці високотемпературного теплоносія і після охолодження поза його межами 20°C . Експериментально встановлено, що незалежно від вмісту сухих

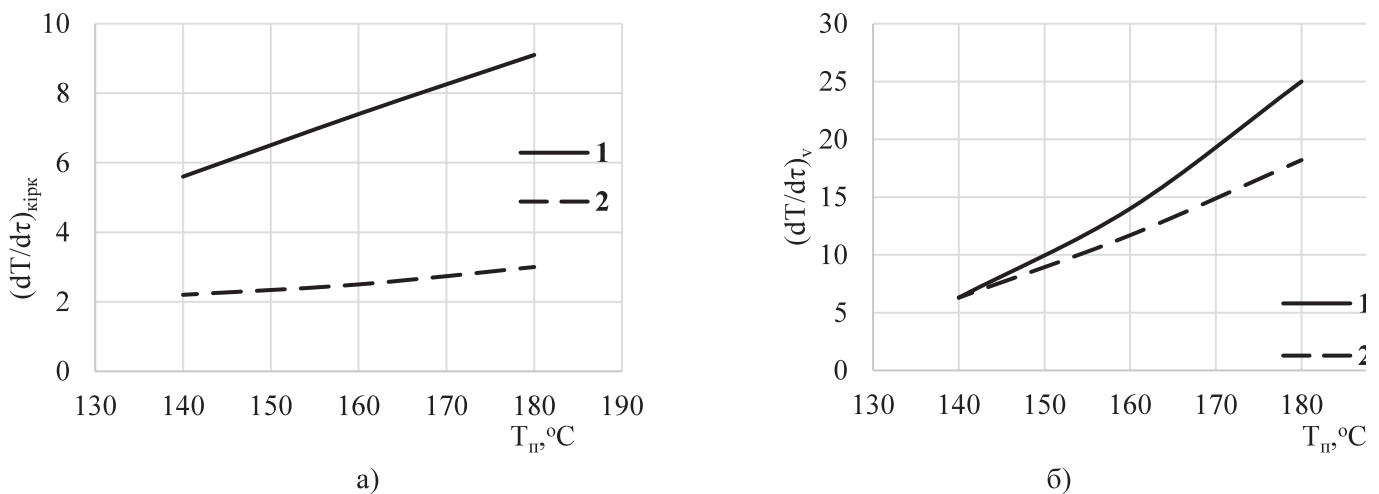


Рис. 3. Кінетичні залежності темпу нагрівання крапель розчинів КСБ з C_o : 1 – 5%; 2 – 10% у стадіях: а) кіркоутворення і б) досушування від температури теплоносія T_n

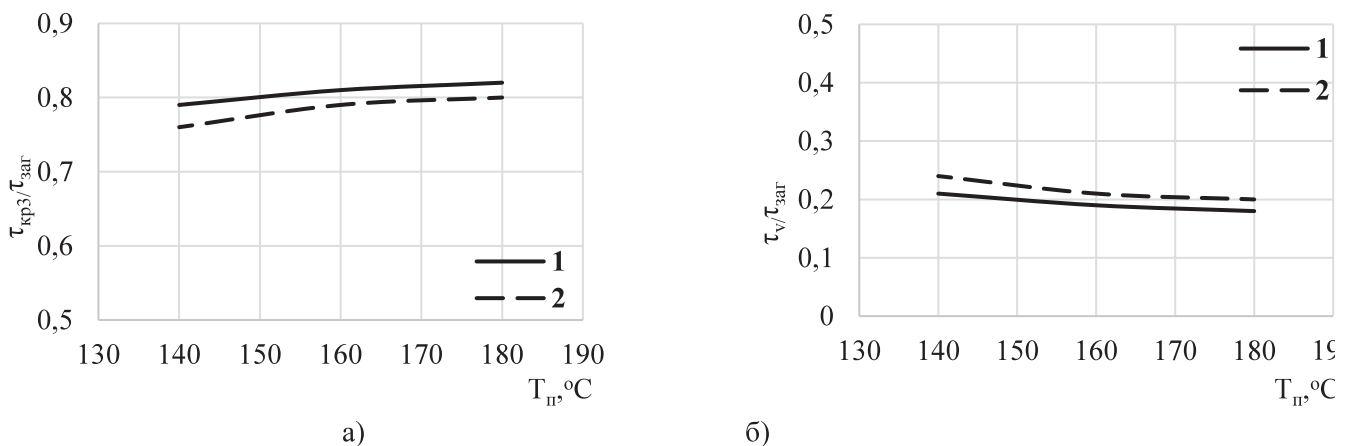


Рис. 4. Кінетичні залежності відносної тривалості а) зневоднення до крапки кр.3 і б) стадії досушування крапель розчинів КСБ з C_o : 1 – 5%; 2 – 10% від температури T_n

речовин усі частки сироваткових білків були сухими, в потоці теплоносія і після охолодження термопластичних властивостей не проявляли. Через низький вміст сухих речовин частки мали тонкостінну структуру. Висушені з 10% розчину мали більш міцну і менш крихку структуру, ніж з 5%-го розчину, що вказує на доцільність збільшення вмісту сухих речовин у вихідному розчині для більшої міцності і монолітності висушених часток і, тим самим, для покращення структурно-механічних властивостей порошку і своєчасного видалення його з зони термічної дії в сушарці

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі. Дослідження показали, що із збільшенням вмісту сухих речовин від 5% до 10% у розчині білків сироватки тривалість випарювального періоду скоротчується у 2,5 – 3 рази, а темп нагрівання знижується у стадіях: кіркутворення - у 3 рази і досушування - на 16% і 27% при $T_n = 160$ і 180°C відповідно, що сприяє створенню щадних умов для сушіння фруктових і ягідно-білкових композицій і, тим самим, збереженню їх термолабільних біоактивних складових.

Експериментально встановлено, що за показників $\tau_{\text{крз}}/\tau_{\text{заг}} \geq 0,8$ і $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{заг}} \approx 0,2$ розчини сироваткових білків належать до рідинних систем, здатних висушуватись до стану сипкого порошку низької кінцевої вологості.

Встановлено, що підвищення температури від 140°C до 180°C і вмісту сухих речовин від 5% до 10% сприяє на 15% більшому скороченню загального часу сушіння крапель розчинів сироваткових білків за умов ущільнення та зміцнення структури висушених часток.

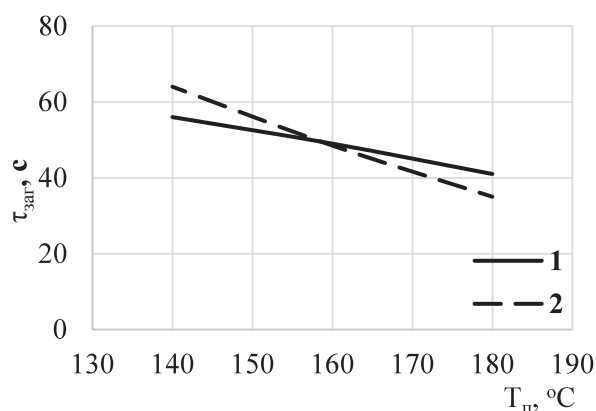


Рис. 5. Кінетичні залежності загального часу зневоднення крапель розчинів КСБ C_o : 1 – 5%; 2 – 10% від температури теплоносія T_n

ЛІТЕРАТУРА

1. Chad M. Kerksick, Chapter 38 - Requirements of Proteins, Carbohydrates, and Fats for Athletes, Editor(s): Debasis Bagchi, Sreejayan Nair, Chandan K. Sen, Nutrition and Enhanced Sports Performance (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 443-459, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2>.
2. M. Flambeau, C. Le Bourgot, A. Van der Mijnsbrugge, F. Respondek, A. Redl, Chapter 4 - Proteins from Wheat: Sustainable Production and New Developments in Nutrition-Based and Functional Applications, Editor(s): Sudarshan Nadathur, Janitha P.D. Wanasundara, Laurie Scanlin, Sustainable Protein Sources (Second Edition), Academic Press, 2024, Pages 77-91, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91652-3.00024-1>.
3. Sandeep Tiwari, Arun K. Jaiswal, Lucas G.R. Gomes, Syed B. Jamal, Munazza Kanwal, Edson L. Folador, Debmalya Barh, Vasco Azevedo, Protein-Protein Interaction Networks: Theory, and Applications, Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2024, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00113-5>.
4. David A. Korasick, Joseph M. Jez, Protein Domains: Structure, Function, and Methods, Editor(s): Ralph A. Bradshaw, Gerald W. Hart, Philip D. Stahl, Encyclopedia of Cell Biology (Second Edition), Academic Press, 2023, Pages 106-114, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821618-7.00061-4>.
5. Md. Amdadul Haque, Yakindra Prasad Timilsena, Benu Adhikari, Food Proteins, Structure, and Function, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03057-2>.
6. Asfaw T. Mestawet, Thomas C. France, Patrick G.J. Mulcahy, James A. O'Mahony, Component partitioning during microfiltration and diafiltration of whey protein concentrate in the production of whey protein isolate, International Dairy Journal, Volume 157, 2024, 106006, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106006>.
7. Shayanti Minj, Sanjeev Anand Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics Journal of Dairy Science Volume 105, Issue 3, March 2022, pp. 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
8. Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X. Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2018.1506477>

9. Tontul I., Topuz A. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol.63. P.91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>

10. Сироватковий протеїн КСБ 65 BIOs 1 кг [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://powerway.com.ua/product/sirovatkovi-y-protein-ksb-65-bios-1-kg/> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

11. Протеїн BIOs Техмолпром КСБ-УФ 65, 1 кг [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://5lb.ua/ua/protein/bios-tehmolprom-ksb-uf-65-1kg.html> Назва з екрану. Дата звернення: 21 серпня 2024 р.

12. Протеїн КСБ 65 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://profiprot.com.ua/ua/p52504985-protein-ksb-ukraina.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024р.

13. Концентрат сироваткового білка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://malik-group.com.ua/ua/p1264470636-kontsentratsyvorotochnogo-belka.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

14. КСБ-УФ 80% концентрат сивороткового білка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lactose.com.ua/ua/p684212832-ksb-syvorotochnyj-proteinovyj.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

15. Долинский, А. А., Малецкая, К. Д. (2011). Распылительная сушка. В 2-х т. Т. 1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев: Академперіодика. 376с.

DRYING KINETICS OF WHEY PROTEIN SOLUTIONS AS A STRUCTURING COMPONENT FOR FRUIT AND BERRY-PROTEIN COMPOSITIONS

Turchyna T. Ya.¹, Avdieieva L. Yu.², Makarenko A. A.³, Dekusha H. V.⁴

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

¹PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

⁴PhD (Engin.), <http://orcid.org/0000-0002-8829-8221>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.5>

Abstract. The article is dedicated to the experimental study of drying kinetics in the "drop–vapor–gas environment" system for whey protein solutions as a structure-forming component capable of enhancing the efficiency of drying composite products based on fruit and berry raw materials using spray drying.

The aim of the work was to study the dehydration kinetics of individual droplets of whey protein solutions in the "drop–vapor–gas environment" system within a flow of heated heat carrier.

Materials and Methods. The study used solutions containing 5% and 10% dry matter, prepared by dissolving whey protein powder concentrate after ultrafiltration (WPC-UF) in water, according to "DSTU 4458:2005. Protein Milk Concentrates. Technical Specifications." The research was conducted on an experimental setup designed to study the drying process of single droplets, approximately 1.5 mm in size, of liquid systems in a flow of heated heat carrier.

Results: The research showed that for droplets of whey protein solutions with a higher content of dry matter (10%), increasing the temperature of the heat carrier from 140°C to 180°C results in a 15% reduction in overall drying time compared to a 5% solution, under conditions of densification and strengthening of the structure of the dried particles.

It was experimentally established that the main factor influencing the drying efficiency of whey protein solution

droplets (or fruit compositions with it) is the content of dry matter (proteins). For a solution with a higher dry matter content (10%), regardless of the drying temperature, there is a significant reduction in the heating rate of the droplets (in the crust formation stage - 3 times compared to a 5% solution) and correspondingly high values of relative drying time to the point τ_3 (≥ 0.8), which proves the ability of whey proteins to dry to a free-flowing powder state with low final moisture content.

Ref. 15, figures 5.

Keywords: drop, solution, whey proteins, temperature of the heat carrier, drying kinetics.

1. Chad M. Kerksick, Chapter 38 - Requirements of Proteins, Carbohydrates, and Fats for Athletes, Editor(s): Debasis Bagchi, Sreejayan Nair, Chandan K. Sen, Nutrition and Enhanced Sports Performance (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 443-459, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2>.

2. M. Flambeau, C. Le Bourgot, A. Van der Mijnsbrugge, F. Respondek, A. Redl, Chapter 4 - Proteins from Wheat: Sustainable Production and New Developments in Nutrition-Based and Functional Applications, Editor(s): Sudarshan Nadathur, Janitha P.D. Wanasundara, Laurie Scanlin, Sustainable Protein Sources (Second Edition), Academic Press, 2024, Pages 77-91, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91652-3.00024-1>.

3. Sandeep Tiwari, Arun K. Jaiswal, Lucas G.R. Gomes, Syed B. Jamal, Munazza Kanwal, Edson L. Folador, Debmalya Barh, Vasco Azevedo, Protein-Protein Interaction Networks: Theory, and Applications, Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2024, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00113-5>.

4. David A. Korasick, Joseph M. Jez, Protein Domains: Structure, Function, and Methods, Editor(s): Ralph A. Bradshaw, Gerald W. Hart, Philip D. Stahl, Encyclopedia of Cell Biology (Second Edition), Academic Press, 2023, Pages 106-114, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821618-7.00061-4>.

5. Md. Amdadul Haque, Yakindra Prasad Timilsena, Benu Adhikari, Food Proteins, Structure, and Function, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03057-2>.

6. Asfaw T. Mestawet, Thomas C. France, Patrick G.J. Mulcahy, James A. O'Mahony, Component partitioning during microfiltration and diafiltration of whey protein concentrate in the production of whey protein isolate, International Dairy Journal, Volume 157, 2024, 106006, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106006>.

7. *Shayanti Minj*, Sanjeev Anand Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics Journal of Dairy Science Volume 105, Issue 3, March 2022, pp. 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
8. *Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X.* Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2018.1506477>
9. *Tontul I., Topuz A.* Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol.63. P.91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
10. *Syrovatkovi protein KSB 65* BIOs 1 kg [Whey Protein KSB 65 BIOs 1 kg] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://powerway.com.ua/product/sirovatkovi-protein-ksb-65-bios-1-kg/> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
11. *Protein BIOs Tekhmolprom KSB-UF 65*, 1 kg [Protein BIOs Tekhmolprom KSB-UF 65, 1 kg] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://5lb.ua/ua/protein/bios-tehmolprom-ksb-uf-65-1kg.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 21 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
12. *Protein KSB 65* [Protein KSB 65] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://profiprot.com.ua/ua/p52504985-protein-ksb-ukraina.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
13. *Kontsentrat syrovatkovoho bilka* [Whey Protein Concentrate] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://malik-group.com.ua/ua/p1264470636-kontsentrat-syvorotochnogo-belka.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
14. *KSB-UF 80%* kontsentrat syvorotkovoho bilka [WPC-UF 80% Whey Protein Concentrate] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://lactose.com.ua/ua/p684212832-ksb-syvorotochnyj-proteinovyj.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
15. *Dolinskyi, A. A., Maletskaya, K. D.* (2011). Raspylitelnaia sushka. V 2-kh t. T. 1. Teplofizicheskie osnovy. Metody intensyfikatsii i enerhosberezheniia [Spray Drying. In 2 Volumes. Vol. 1. Thermophysical Fundamentals. Methods of Intensification and Energy Saving]. Kyiv: Akademperiodyka. 376 s. (in Rus.)

Отримано 29.08.2024

Received 29.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 664.8.047

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ СУШІННЯ М'ЯСА КУРЯТИНИ ПРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННІ В ПРОДУКТАХ ШВИДКОГО ПРИГОТУВАННЯ

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

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

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.6>

Визначено кінетику та встановлено раціональні режими сушіння м'яса грудки курятини за комбінованим інфрачервоно-конвективним способом 100Вт + 55 °С та формою (кубики, гранули). Визначено відновлювані властивості сушеного м'яса від форми зразків.

The kinetics and rational modes of drying chicken breast meat using the combined infrared-convective method of 100 W + 55 °C and the form (cubes, granules) were determined. The renewable properties of dried meat from the shape of the samples were determined.

Бібл. 10, рис. 5., табл. 1.

Ключові слова: конвективне сушіння, інфрачервоне випромінювання, ефективні режими сушіння, м'ясо курятини.

Вступ. В сучасних умовах ведення бойових дій на території України існує потреба якісного харчування бійців на передовій та населення в екстремальних умовах, де забезпечити нормальне гаряче харчування неможливо. Пропонуються страви, які зручні у використанні, мають тривалий термін зберігання, відповідають сучасним уявленням про здорове та функціональне харчування. З огляду на це, застосування в продуктах швидкого приготування, а саме в різних супах та борщу, спеціально підготовленого сушеного м'яса курятини, яка є натуральним продуктом і підвищує його калорійність, що є досить актуальною справою.

Сушіння м'яса застосовувалося давно для якісного та тривалого збереження цього продукту. Його використовували у Стародавньому Єгипті, Іспанії, Мексиці. А в античній літературі у Платона, Евріпіда і Гомера зберігся опис бенкетів, в яких йшлося про велику різноманітність м'ясних продуктів. На столах давньогрецьких, давньоримських правителів і вельмож у величезній кількості були присутні солоне, сушене, копчене, в'ялене м'ясо свійських і диких тварин [1].

Сушіння м'яса застосовували індіанці Південної Америки та кочові племена північноамериканських жителів. Такий спосіб оцінили іспанські конкістадори, які подорожуючи під палючим сонцем, просто розклали шматочки м'яса на дахи своїх возів, де вони висувалися. І в наші часи кількість любителів сушеного м'яса не зменшується, і воно досі залишається популярним. Тому в сучасних магазинах представлений величезний асортимент такого делікатесу.

Даних по зневодненню вареного м'яса мало, а воно сьогодні починає широко використовуватись в продуктах швидкого приготування (супів, каш та ін.).

М'ясо є незамінним джерелом білка, з якого будується м'язова тканина людини. Воно особливо необхідне для людей, які займаються важкою фізичною працею, а також для військовослужбовців, спортсменів, мандрівників та туристів. У висушеному м'ясі зберігаються протеїни, мікроелементи, амінокислоти в більш концентрованому вигляді, у ньому є цинк, залізо, вітаміни групи В, які корисні для здоров'я людини.

Сушене м'ясо при вживанні поступово розбухає у шлунку, повільно насичуючи організм корисними харчовими компонентами, даруючи почуття ситості і приплив сил. Це простий і швидкий перекус, який допомагає швидко відновити сили. Що дуже важливо для людей, які отримують посилені фізичні навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В Україні функціонують декілька підприємств із виробництва сушеного м'яса. Проте обсяг їх виробництва та асортимент продукції обмежені. На сьогодні відомі способи сушіння м'яса в камерних, каналних, шафових сушарках, а також на відкритому повітрі. Враховуючи тривалість даних способів сушіння сировину перед сушінням спеціально обробляють [1]. Основними недоліками конвективного методу сушіння м'яса в камерних, каналних, шафових сушарках є втрати в сухому продукті розчинних білків та

значна тривалість процесу. Тому ці способи сушіння застосовуються обмежено на дрібних підприємствах [2]. Відоме промислове використання мікрохвильової НВЧ-енергії для сушіння різних харчових продуктів, у тому числі й м'яса. Характер сушіння дозволяє різко інтенсифікувати процеси тепло- і масообміну та зменшити тривалість сушіння.

За останні роки запропоновані різні варіанти сушильних установок із використанням НВЧ-енергії, в тому числі в різних комбінаціях з іншими методами: конвекцією, інфрачервоним випромінюванням, ультрафільтрацією і ін. Але такі установки вітчизняного виробництва відсутні. Сублімаційне сушіння є найбільш поширеним способом зневоднення. Воно полягає в тому, що в умовах вакууму із замороженого продукту сублімують лід, який перетворюється на пару, минаючи рідку фазу. При такому висушуванні забезпечуються мінімальні зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей продукту не тільки в процесі сушіння, але й при тривалому зберіганні [3].

Проте, сублімаційне сушіння є досить складне і вартісне, тому не набуло широкого використання. Специфічні властивості окремих м'ясних продуктів зумовлюють різні вимоги до процесу сушіння, а, отже, і до режиму його проведення. Під час організації сушіння необхідно врахувати технологічні властивості продуктів, як об'єктів сушіння. Значення цих властивостей і закономірностей зміни їх під час сушіння залежно від параметрів процесу дає можливість вибору найбільш раціонального способу і режиму сушіння. Раціональні параметри сушіння забезпечують мінімальні витрати енергії при максимальному збереженні високої якості продуктів. Інтенсифікація багатьох способів сушіння відбувається, головним чином, за рахунок підвищення температури сушильного агента. Проте для деяких продуктів застосування високих температур взагалі неприпустимо з технологічних міркувань (сушіння м'яса, овочів, фруктів тощо) [4]. Для удосконалення технології виробництва сушеного м'яса, надання йому певних функціонально-технологічних властивостей виникає необхідність застосування нових способів сушіння м'ясної сировини. У Харківському державному університеті харчування та торгівлі використовували сушіння зі змішаним теплопідведенням. На відміну від інших розповсюджених способів є створення особливих умов взаємодії матеріалу, що зневоднюється, з сушильним агентом – повітрям, зниженням енерговитрат та тривалості процесу, високій якості отриманого продукту за харчовою цінністю, яка не поступається сублімованим продуктам [4]. Метод зі змішаним теплопідведенням є непоширеним через відсутність таких сушарок.

Усе вищесказане, зумовило розроблення комбінованого інфрачервоно-конвективного способу сушіння.

Постановка проблеми є ефективна переробка білковмісної сировини тваринного походження високої біологічної цінності. Дослідження кінетики процесу зневоднення курячої грудки з урахуванням властивостей матеріалу і режимів сушіння інфрачервоно-конвективним та конвективним способами.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Метою роботи є встановлення раціональних параметрів сушіння м'яса курятини комбінованим інфрачервоно-конвективним та конвективним способами. Завданням роботи було вивчення кінетики сушіння та дослідження відновлювальних властивостей сушеного м'яса курятини, отриманого при різних режимах зневоднення.

Методика проведення досліджень. При проведенні досліджень застосовували експериментальні методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів сушіння: часу проведення досліду, температури теплоносія та зменшення маси матеріалу за допомогою автоматизованих систем збору та обробки інформації в розроблених програмах "Sooshka", та "Cooler" на спеціально спроектованих і виготовлених установках. Для обробки експериментальних даних використовувались методи математичного планування експерименту, а отримані дані оброблялись у сучасних інтегрованих системах Excel та Mathcad.

Для оцінки якості м'яса курятини використані стандартні методи досліджень. Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів.

Одним із основним параметрів сушіння є температура теплоносія, яка сприяє формуванню відповідних функціонально-технологічних властивостей сушеного м'яса. Параметрами сушіння формують відповідні функціонально-технологічні властивості сушеного м'яса. Під час досліджень було використано курячу грудку.

На функціональні властивості отриманої продукції впливає попередня підготовка сировини (нарізання, варіння). Теплова обробка м'яса доводить продукт до споживчої якості, зменшує мікробне та гельмінтне забруднення. М'ясо курячої грудки нарізали на шматочки 10х10х10 см та варили протягом 10 хв з моменту закипання. Після цього, для дослідження процесу сушіння, нарізали м'ясо на кубики формою 5х5х5 мм. Для отримання гранул використовували побутову м'ясорубку з діаметром сітки 5 мм, на якій перекручували відварене м'ясо, в результаті чого були отримані гранули діаметром 5 мм.

Дані для побудови кривих сушіння були отримані на експериментальному стенді з автоматичним збором та обробкою інформації [5]. При цьому автоматично фіксувалась маса зразка та зміни його температури в процесі сушіння. Зневоднення відбувається нагрітим повітрям при постійному режимі, тобто при постійній температурі повітря t_c , його відносній волозі ϕ та швидкості руху теплоносія v . Для інтенсифікації процесу сушіння було використано стенд із встановленим в сушильну камеру блоком інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку від 100 Вт/м² до 3800 Вт/м². Зміна потужності ламп відбувається регулятором реостатного типу [6, 7, 8].

Інфрачервоне або радіаційне сушіння – видалення рідини, найчастіше всього води з матеріалів при підводі до них теплоти ІЧ випромінюванням (ІЧВ). Пристрої з ІЧВ сушінням знайшли використання в різних галузях промисловості. Основним недоліком ІЧВ сушіння є нерівномірність випромінювання, яке надходить на нерівну поверхню дисперсних матеріалів при їх зневодненні через що відбувається їх локальний перегрів або недогрів. Найбільше ці недоліки проявляються при сушінні ІЧВ термолабільних матеріалів, температура яких не може перевищувати 50 °С. До них відносяться матеріали рослинного і тваринного походження, а також велика кількість полімерів. При цьому треба мати на увазі, що термічне руйнування, наприклад, матеріалів тваринного походження призводить не тільки до «обуглювання» продуктів сушіння, а й до теплового руйнування в продукті амінокислот, втрати вітамінів та інших біологічно активних компонентів силовини [9].

Теплове випромінювання, яке використовується в техніці, має довжину хвилі в інтервалі $\lambda = 0,8-800$ мкм [9]. Передача необхідної для випарювання енергії від джерела випромінювання до молекул води в складі, матеріалу, що зневоднюється, відбувається збудженням теплових коливальних процесів резонансними частотами спектра випромінювання молекул води і молекул самого матеріалу. В загальному випадку для взаємодії теплового випромінювання з матеріалом, сушіння є актуальним в усьому інфрачервоному діапазоні довжини хвиль. Тому, при виборі джерела випромінювання можливо розглядати його як абсолютно чорне або сіре тіло, яке має цілий спектр випромінювання з розподілом, яке описується законом Планка [10].

$$e(\lambda nT) = 2\pi C_1(n) \left(\lambda^5 \left[e^{\frac{C_2(n)}{\lambda T}} - 1 \right] \right)^{-1} \quad (1)$$

де, $e(\lambda nT)$ – спектральна напівкуляста густина випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м³; λ – довжина хвилі, м; T – абсолютна температура, К; $C_1(n) = h C(n)^2$;

$$C_2(n) = \frac{hc(n)}{K}; \quad C(n) = \frac{C_0}{n}; \quad C_0 = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ – швидкість}$$

світла в вакуумі, м/с; n – коефіцієнт переломлення середовища; $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж*с; $K = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ – постійна Больцмана.

Дослідженнями встановлено, що найбільш оптимальний при використанні в установках ІЧВ сушіння є лампові джерела випромінювання – лінійні газонаповнені лампи розжарювання з вольфрановою спіраллю. Такі лампи малоінерційні, що забезпечує високу керованість процесом теплового впливу на матеріал, а також в найбільшій мірі відповідають вимогам екологічної чистоти при переробці термолабільних матеріалів.

Тому при дослідженнях кінетики сушіння м'яса курятини був використаний ламповий ІЧВ нагрівач, а тривалість його дії керувалась значенням температури, матеріалу, що зневоднюється [9].

Сушильна камера має прозоре скло через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння (рис. 1). Через скло видно зміни кольору матеріалу та усадку.

Всі ці зміни взаємопов'язані та впливають на механізм перенесення теплоти та вологи в матеріалі під час сушіння. Процес сушіння є нестаціонарним, він ускладнений випаровуванням вологи та переносом теплоти. Процес сушіння описується за допомогою кривих сушіння кривими швидкості сушіння та температурними кривими.



Рис. 1. Зовнішній вигляд сушильної камери із застосуванням інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку від 100 Вт/м² до 3800 Вт/м²

На рис. 2. представлена кінетика сушіння м'яса курятини (грудка) при різних режимах конвективним сушінням (55 °С, 80 °С) та комбінованим інфрачервоним випромінюванням із конвективним 100 Вт+55 °С.

Криві сушіння характеризують зміну середньої (інтегральної) вологи матеріалу W в часі t і мають характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів вигляд.

Як видно з рис. 2, конвективне сушіння при температурі теплоносія 80 °С, відбувається досить інтенсивно. Температура матеріалу швидко досягає критичної межі 57 °С на 18-19 хвилині процесу (крива 3'), при цьому вологість матеріалу знизилась більше, ніж на половину $W=30\%$ (крива 3). Висушений до кінцевої вологості матеріал був неякісний. За рахунок розкладання цінних харчових компонентів його кінцева вологість більша, ніж при режимі 55 °С. Це показує, що інтенсивний режим 80 °С досить небезпечний і його можна застосовувати лише нетривалий час, поки температура матеріалу не перевищила критичну межу 57 °С.

При температурі теплоносія 55 °С, процес сушіння досить повільний. Тривалість сушіння (крива 1, 1') біля 120 хв, що у 2 рази довше, ніж при режимі 80 °С. але при цьому режимі прогрів матеріалу дуже повільний кінцева його температура не перевищує критичну межу 57 °С.

Дослідження комбінованого режиму, при якому відбувається весь час конвективний спосіб сушіння при

55 °С, але для інтенсифікації процесу на початку експерименту матеріал піддавався ще й ІЧВ. В результаті відбулося інтенсивне прогрівання матеріалу, при якому вже через 5 хв матеріал досягнув температури майже 55 °С, при цьому вологість була $W=58\%$, тобто вона знизилась від початку процесу всього на 15 %. Щоб матеріал не перетнув критичну температурну межу, ІЧВ було вимкнено і далі відбувалось лише конвективне сушіння при 55 °С.

Отже, при застосуванні на початковому етапі сушіння ІЧВ показало, що інтенсивність сушіння висока. Вона, як видно з кривої 2, на початку процесу сушіння така як при конвективному сушінні 80 °С (крива 3). Це дозволило скоротити процес сушіння до кінцевої вологості матеріалу в порівнянні з безпечним конвективним режимом 55 °С на 25 %. Висушений матеріал був якісний і відповідав всім вимогам технічних умов на нього.

Криві швидкості сушіння, які показують зміну вологи матеріалу за одиницю часу (dW^c/dt , %/хв), представлені на рис 3.

Криві сушіння побудовані методом графічного диференціювання за кривими сушіння. Швидкість сушіння в даний час визначається як тангенс кута нахилу дотичної, проведеної через точку кривої сушіння, яка відповідає відповідній волозі матеріалу.

Як видно з кривих 1,2,3, на рис. 3 крива 2 з комбінованим нагрівом матеріалу, на початку процесу

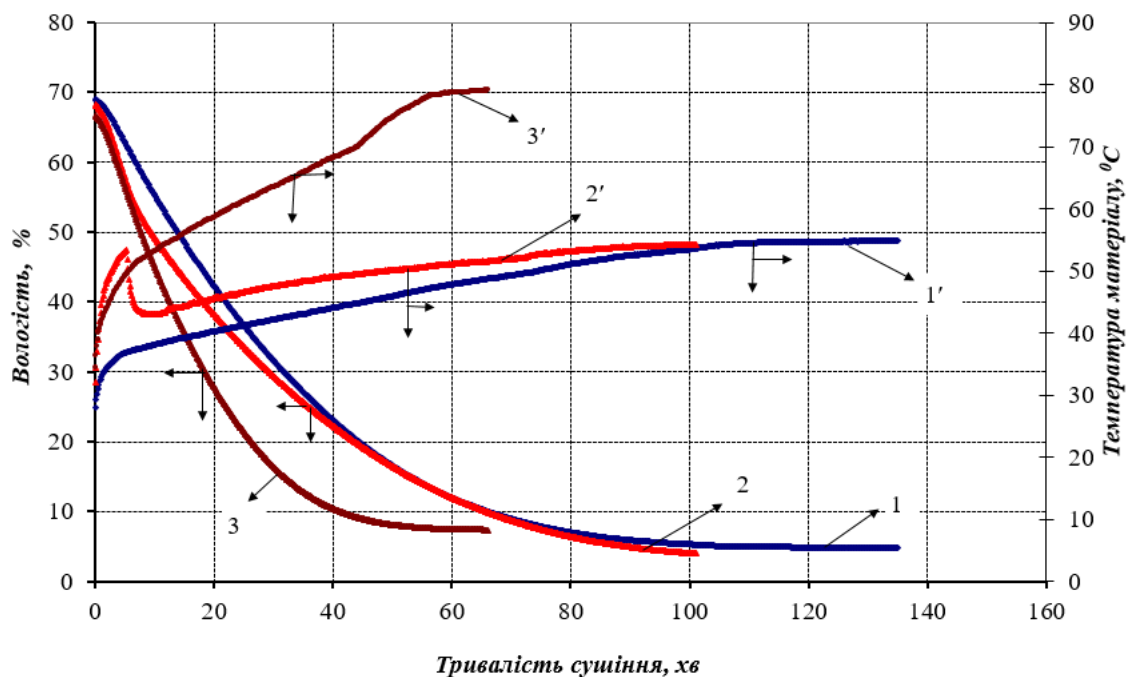


Рис. 2. Зміна вологості м'яса курятини за різних режимів сушіння в елементарному шарі, гранули $d=5 \times 6$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1, 1' – 55 °С; 2 – ІЧ 100 Вт+55 °С; 3 – 80 °С

має найбільшу швидкість сушіння завдяки ІЧВ прогріву м'яса, і яка перевищує конвективний режим сушіння 80 °C на 6 %, а при 55 °C – на 40 °C. Після вимикання ІЧВ швидкість різко знижується, але в подальшому вирівнюється. Найменша швидкість сушіння відповідає температурі режимного параметру 55 °C, що безпечно для м'яса.

Дослідження кінетики сушіння м'яса курятини у вигляді кубиків з розміром 5х5х5 мм при тих самих режимах зневоднення, що і для гранул, представлені на рис. 4. Як видно з рис. 2, початкова вологість гранул становить біля 69 %, а початкова вологість кубиків біля 63 %, що на 6 % менша. Зразок у вигляді гранул поглинає більше води на етапі підготовки, ніж зразок м'яса у вигляді кубиків.

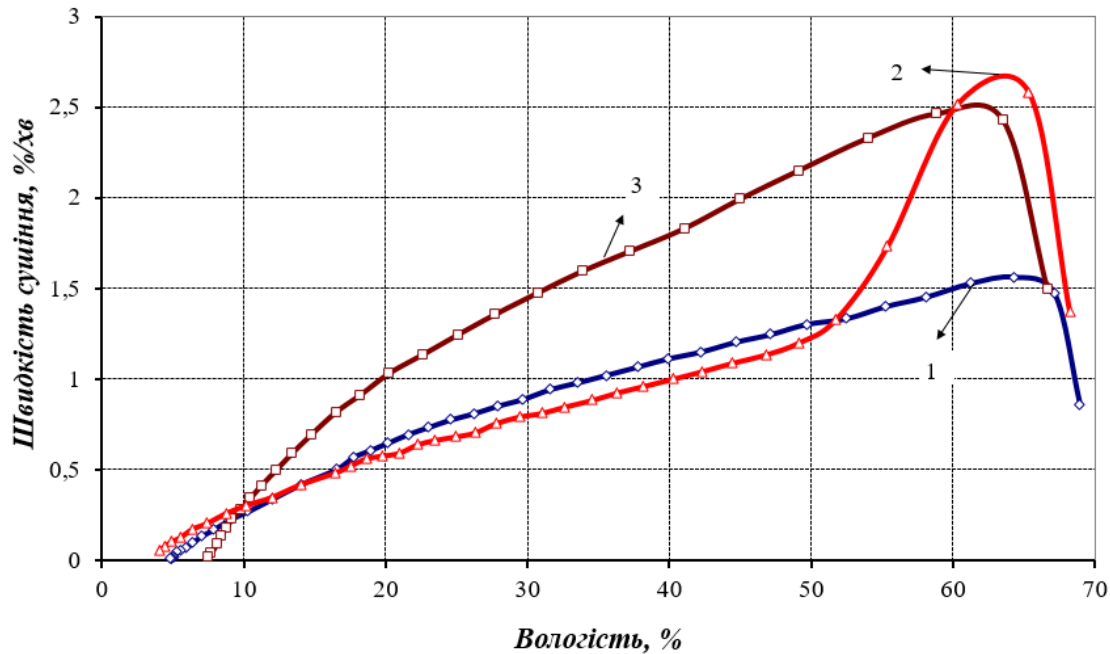


Рис. 3. Зміна швидкості сушіння м'яса курятини за різних режимів сушіння в елементарному шарі, гранули $d=5 \times 6$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1 – 55 °C; 2 – ІЧ 100 Вт+55 °C; 3 – 80 °C

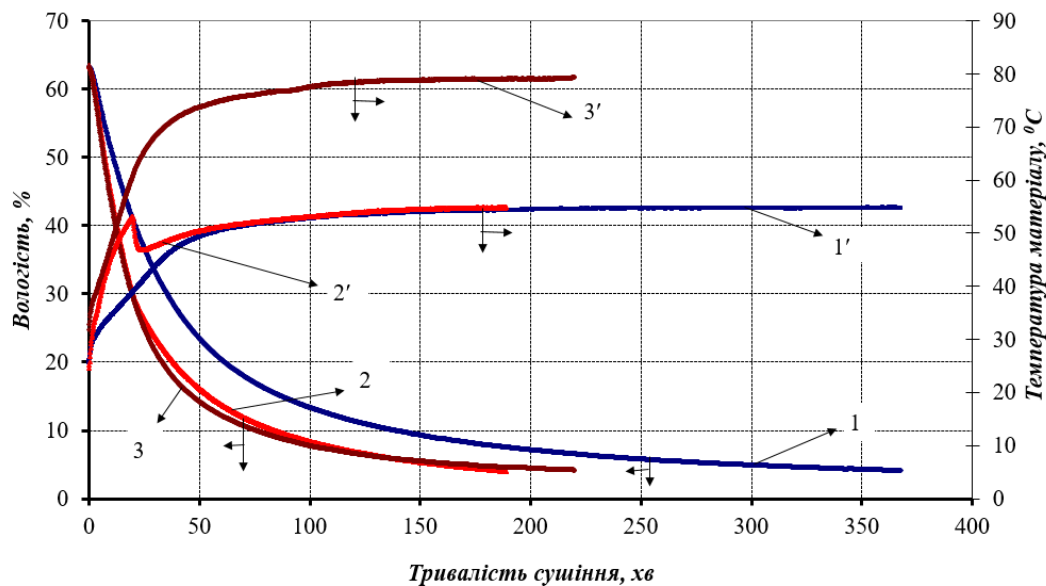


Рис. 4. Зміна вологості м'яса курятини за різних режимів сушіння в елементарному шарі, кубики 5х5х5 мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1 – 55 °C; 2 – ІЧ 100 Вт+55 °C; 3 – 80 °C

З рис. 4 видно, що криві сушіння при інтенсивному режимі 80 °С та комбінованому

100 Вт+55 °С до вологості 28-29 % співпадають. Але температурні криві показують, що комбінований режим безпечний (рис. 4., крива 2'), тому що температура матеріалу не перевищує критичну межу 57 °С і зразок м'яса мав високу якість. В той же час при режимі 80 °С, якість м'яса була краща, ніж при сушінні гранул при тому ж режимі, але теж не відповідала вимогам технічних умов на м'ясо. Тривалість сушіння при комбінованому режимі на 43 % менша, ніж при конвективному режимі 55 °С, а якість відповідає технічним умовам на м'ясо.

Порівняння кривих сушіння гранул і кубиків м'яса, (рис. 2,3) показує, що тривалість сушіння гранул при комбінованому режимі 100 Вт+55 °С менша за тривалість сушіння при тому ж режимі кубиків в 2,2 рази. При цьому вага гранули та кубика однакова та становить 0,5 г. Порівняння тривалості конвективного сушіння при температурі 55 °С показує, що гранули зневоднюються швидше за кубики в 2,5 рази.

Аналіз кривих швидкості сушіння кубиків показує, що вони відрізняються від кривих сушіння гранул. При зневодненні кубиків максимальна швидкість зневоднення при конвективному сушінні 80 °С більша, ніж

при комбінованому режимі на 4 %. При комбінованому сушінні прогрів матеріалу відбувається значно повільніше у кубиків, ніж у гранул.

Різниця в сушінні м'яса курятини у вигляді гранул і кубиків цільного вареного м'яса пояснюється різницею в структурі зразків. При утворенні гранул була порушена структура білків м'яса, в той час як у кубиках цільного м'яса вона не порушувалась і тому випаровування вологи з гранул відбувається краще, а від цього і інтенсивність процесу зневоднення вища.

Основними речовинами протоплазми клітини, які зв'язують воду за допомогою водневих зв'язків є білки, в поліпептидному ланцюгу яких знаходяться гідрофільні групи CO , NH_2 , NH , ON , CON . Під час сушіння сировини білки частково денатурують та коагулюють, в результаті чого можлива колоїдна незворотність сушених продуктів. Взаємодія води з висušеним м'ясом має важливе значення в подальшому його використанні в продуктах швидкого приготування. Білкові речовини, у білковомісних продуктах, в технологічному процесі приготування супів можуть мати важливе значення лише при наявності певної кількості води, яка йде на їх відновлення. Як правило, продукти з високим вмістом білку в значній кількості здатні до додаткової гідратації, оскільки вони можуть зв'язувати воду в значно більшій

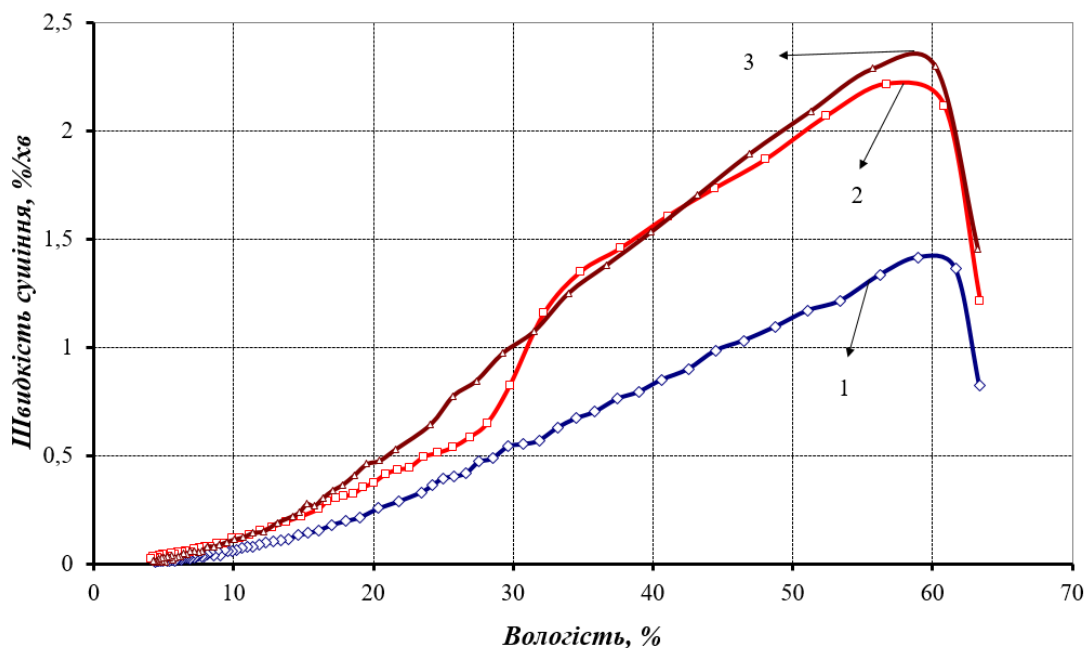


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння м'яса курятини (кубики) за різних режимів сушіння в елементарному шарі, кубики $d=5 \times 5 \times 5$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:

1 – 55 °С; 2 – ІЧ 100 Вт+55 °С; 3 – 80 °С

кількості, ніж вона фізично присутня в продукті. До таких продуктів відноситься м'ясо, риба, яйця. Продукти, в складі яких наявна значна кількість вологи та мало білків, останні повністю гідратовані та не здатні на додаткову гідратацію. До таких продуктів відносять молоко, більшість овочів та фруктів.

Білки, які знаходяться у висушеному стані, проходять гідратацію в кілька етапів. Одним із таких етапів є процес набухання. Набухання – це спонтанний процес поглинання високомолекулярним білком низькомолекулярної рідини, у даному випадку, води. Цей процес призводить до значного збільшення маси та об'єму висушеного м'яса. Під час набухання високомолекулярної речовини вода проникає в глибину завдяки нещільній структурі висушеного білку м'яса. Молекула води, проникаючи всередину зразка, заповнює простір між макромолекулами, відсовуючи їх один від одного, послаблюючи при цьому міжмолекулярний простір. У утворені щілини проникають нові молекули води, в результаті цього збільшується об'єм висушеного зразка під час набухання. Так, наприклад, при набуханні желатину, його об'єм збільшується в 14 разів [10].

Оцінка набухання проводиться за допомогою коефіцієнту набухання (K_n), який показує відносне збільшення маси продукту після набухання і визначає здатність до відновлення початкових якостей матеріалу при зневодненні.

Коефіцієнт набухання визначається за формулою:

$$K_n = \frac{G_2}{G_1}, \quad (2)$$

де K_n – коефіцієнт набухання;

G_1 та G_2 – маса матеріалу до та після набухання відповідно, г.

Таблиця 1. Визначення коефіцієнту набухання сушеного м'яса курячого при температурі відновлення 45 °C та 90 °C та співвідношення води 1:10

№ п/п	Форма матеріалу	Режим сушіння	K _n		Відновлюваність, %	
			t води при відновленні, °C			
			45	90	45	90
1	гранули	55 °C	3,78	4,08	120,9	130,7
2	гранули	100 Вт+55 °C	3,66	3,77	116,4	120,3
3	гранули	80 °C	1,95	2,08	77,1	80,1
4	кубики	55 °C	2,09	2,24	97,7	98,9
5	кубики	100 Вт+55 °C	2,06	2,23	98,1	106,2
6	кубики	80 °C	1,72	1,87	75,2	80,6

Відновлюваність матеріалу B – величина, яка показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближується до вихідної маси, яка приймається за 100 %. Визначається за формулою:

$$B = \frac{S_0}{S_1} * K_n * 100 \%, \quad (3)$$

де S_0 - вміст сухих речовин у вихідному матеріалі, %, $S_0 = 100 \% - W_{\text{поч}}$

S_1 - вміст сухих речовин у висушеному матеріалі, %, $S_1 = 100 \% - W_{\text{кінц}}$

Тому важливим етапом є дослідження регідратаційних властивостей сушеного м'яса, отриманого при різних способах його підготовки та режимах сушіння. Був визначений коефіцієнт набухання (K_n) та відновлюваність (B) курячого м'яса у воді з температурою 45 °C і 90 °C при співвідношенні 1:10. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Відомо з літературних даних, відновлюваність білків висока завдяки їх структурі. Відновлюваність м'яса у формі гранул навіть при температурі сушіння 80 °C $B = 77,1 - 80,1 \%$, а кубиків $B = 75,2 - 80,6 \%$, що є досить високим показником, якщо його порівнювати із висушеною рослинною сировиною, але для м'яса – це низький показник і пояснюється впливом високої температури на білок.

Як видно з таблиці 1, м'ясо сушене у вигляді гранул має високу відновлюваність при комбінованому способі 100 Вт + 55 °C сушіння з t становить $B = 120,3 \%$ та конвективному з температурою 55 °C

$B = 130,7 \%$ відповідно. Також на відновлюваність має великий вплив форма і структура зразка. При однакових режимах сушіння кубики відновлюються на 12-24 % менше, ніж гранули, що негативно впливатиме на якість супів швидкого приготування. Як видно з таблиці 1, температура води при відновленні м'яса, яка становить

45 °C та 90 °C не суттєво впливає на процес. Температура води 90 °C дає максимальне відновлення зразків. Температура води 45 °C також має наближені показники до оптимальних.

Дослідження з визначення коефіцієнту набухання та відновлюваності показали про можливість використання значно нижчих температур для відновлювання м'яса курятини при заварюванні супів, що дає ширший діапазон у їх використанні.

Висновки.

Встановлено ефективний комбінований інфрачервоно-конвективний режим сушіння м'яса курятини 100 Вт + 55 °C.

Встановлена енергоефективна температура відновлення м'яса курятини 45 °C при його використанні в продуктах швидкого приготування.

Відновлюваність вареного подрібненого в м'ясорубці і висушеного м'яса курятини вища на 12 - 24 %, ніж відновлюваність зварених висушених кубиків того ж м'яса.

Використання м'яса курятини в продуктах швидкого приготування більш раціонально використовувати подрібненим на м'ясорубці та зневодненим у вигляді гранул.

ЛІТЕРАТУРА

1. Клименко М.М., Віннікова Л.Г., Береза І.Г., Гончаров Г.І., Пасічний В.М., Баль-Прилипко Л.В., Кишенько І.І., Буша О.О., Ткаченко К.Д. Технологія м'яса та м'ясних продуктів. Підручник під ред. М.М. Клименка. К.: Вища освіта, 2006; 640 с. ISBN 966-8081-64-1.
2. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Самойленко К.М., Слободянюк К.С. Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків. Монографія. Тропея, 2022 р., 150 с.

3. Погожих М. І., Євлаш В.В., Нєміріч О.В., Максименко А.Є. Кінетика сушіння м'яса яловичини способом змішаного теплопідведення. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2013; 1 (1): 79-84. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1\(1\)_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1(1)_12).

4. Погожих Н.И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях: дис. д-ра техн. наук, Харьков, 2002; 365.

5. Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Вишневський В.М., Граков Д.П., Граков, О.П. Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. Теплофізика та теплоенергетика, 2021; 43 (3), 24-29.

6. Petrova Zh., Grakov O. Vishnevsky V. Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021; 22 – 24.

7. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Вишневський В.М., Граков О.П. Дослідження кінетики сушіння червонокочанної капусти на конвективній сушарці. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022; 25-27.

8. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Вишневський В.М., Граков, О.П. Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у конвективній сушильній установці. Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса: ОНТУ, 2022; 14-16.

9. Завалий А.А., Снежкін Ю.Ф. Разработка і тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabileльных материалов. Монография. ИТ Ариал, Симферополь, 2016; 262 с.

10. Енциклопедія харчування (в десяти томах). Під ред. Л.З. Шильмана. Том 6. Харків, Мир книг, 2017.

CHOICE OF A RATIONAL MODE OF DRYING CHICKEN MEAT WHEN USED IN FAST COOKING PRODUCTS

Sniezhkin Yu. F.¹, Petrov P. I.²

¹Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>, email: itf_ntps@ukr.net

²graduate student, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, <https://orcid.org/0009-0006-0632-3558>, petrov.mriya@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.6>

In modern conditions conducting military operations on the territory of Ukraine, there is a need for quality food for soldiers on the front line and the population in extreme conditions, where it is impossible to provide normal hot food. The main requirement for such products is increased caloric content, which is provided by protein-containing raw materials of animal origin (chicken meat).

With this in mind, the use of specially prepared dried chicken meat, which is a natural product and increases its caloric content, in fast food products, namely in various soups and borscht, is a rather urgent matter.

In this article, the kinetics and rational modes of drying chicken breast meat using the combined infrared-convective method of 100 W + 55 °C and the form (cubes, granules) are determined. The renewable properties of dried meat from the shape of the samples were determined.

References 10, fig. 5, tabl. 1.

Keywords: convective drying, infrared radiation, effective drying modes, chicken meat.

1. Klymenko M.M., Vinnikova L.G., Bereza I.G., Goncharov G.I., Pasichnyi V.M., Bal-Prylypko L.V., Kyshenko I.I., Bysha O.O., Tkachenko K.D.. Tekhnolohiya m'yasa ta m'iasnykh produktiv [Technology of meat and meat products]. Textbook edited by M.M. Klymenko K.: Higher education, 2006; 640 c. ISBN 966-8081-64-1. (ukr.).

2. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Samoilenko K.M., Slobodianiuk K.S. Teplomasoobminni protsesy otrymannya kombinovanykh funktsional'nykh poroshkiv [Heat and mass transfer processes of obtaining combined functional powders]. Monograph. Tropea, 2022, 150 p. (ukr.).

3. Pohozhykh M.I., Yevlash V.V., Niemirich O.V., Maksymenko A.Ye. Kinytyka sushinnya m'yasa yalovychyny metodom zmishanoho teplopostachannya [Kinetics of beef meat drying by the method of mixed heat supply]. Progressive equipment and technologies of food production, restaurant industry and trade, 2013; 1 (1): 79-84. Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1\(1\)_12.\(ukr.\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1(1)_12.(ukr.)).

4. Pohozhykh M.I. Nauchnyye osnovy teorii i tekhniki sushki pishchevogo syr'ya v massoobmennykh modulyakh [Scientific basis of the theory and technique of drying food raw materials in mass exchange modules] dis. doctor of Technical Sciences, Kharkov, 2002; 365. (rus)

5. Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Vyshnievskyi V.M., Hrakov D.P., Hrakov O.P. Sushinnya bilokachannoyi kapusty na konvektyvnyi sushartsi [Drying white cabbage on a convective drying stand]. Thermophysics and thermal power engineering, 2021; 43 (3), 24-29. (ukr.).

6. Petrova Zh., Hrakov O. Vishnevsky V. Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. A collection of abstracts of reports of the 20th international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Resource-energy-saving technologies and equipment". Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky", 2021; 22 – 24.

7. Petrova Zh., Slobodianiuk K.S., Vyshnievskyi V.M., Hrakov O.P. Doslidzhennya kinytyky sushinnya kapusty chervonoholovoyi na konvektyvnyi sushartsi [Study of drying kinetics of red cabbage on a convective dryer]. Collection of abstracts of reports of the 20th international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Equipment of chemical production and building materials enterprises". Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky", 2022; 25-27.

8. Petrova Zh.O., Slobodianiuk K.S., Vyshnievskyi V.M., Hrakov O.P. Study of drying kinetics of colloidal capillary-porous materials in a convective drying unit. Collection of abstracts of reports of the 19th International Scientific Conference "Improvement of processes and equipment of food and chemical industries". Odesa: ONTU, 2022; 14-16. (ukr.).

9. Zavalii A.A., Sniezhkin Yu.F. Razrabotka i teplovoye modelirovaniye infrakrasnykh sushil'nykh ustanovok dlya termolabil'nykh materialov [Development and thermal modeling of infrared drying devices for thermolabile materials] Monograph. IT Arial, 2016; 262 p.

10. Entsiklopediya kharchuvannya [Encyclopedia of food] (in ten volumes). Ed. L.Z. Shilman. Volume 6. Kharkiv, Mir Knig, 2017

Отримано 16.10.2024

Received 16.10.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 662.767.2.

МОЖЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПЕРЕДОВОГО БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК. ЧАСТИНА 1.

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

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

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

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

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>

Наведено результати аналізу та огляду сучасних технологій, видів мікроводоростей та обладнання для їхнього вирощування на рідкій фракції дигестату біогазових станцій. Представлено поточний стан з виробництва біогазу/біометану в Україні та використання рідкої фракції дигестату. Проаналізовано хімічний склад дигестату та методи підготовки його до культивування мікроводоростей. Запропоновано схему імплементації технології культивування мікроводоростей на біогазовому/біометановому заводі.

The results of the analysis and review of state-of-art technologies, species and equipment for growing microalgae in the liquid fraction of the digestate of biogas plants were presented. The current state of production of biogas/biomethane in Ukraine and the use of the liquid fraction of digestate was presented. The chemical composition of the digestate and the methods of its preparation for the cultivation of microalgae were considered and representative. An implementation scheme of microalgae cultivation technology at the biogas/biomethane plant was developed and suggested.

Бібл. 33, табл. 4, рис. 1.

Ключові слова: біогаз, передовий біометан, мікроводорості, очищення дигестату, виробництво біопалива третього покоління.

БГУ – біогазова установка;

КС – клітинна стінка;

МВ – мікроводорості;

РФД – рідка фракція дигестату;

ТФД – тверда фракція дигестату;

AD – анаеробне зброджування;

COP – сухі органічні речовини;

CAPEX – капітальні витрати;

OPEX – операційні витрати;

PBR – фотобіореактор.

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю пошуку сталих та ефективних рішень на шляху збільшення виробництва відновлюваної енергії та декарбонізації економіки в Україні.

Використання відновлюваних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики України, спрямованої на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів, поліпшення стану навколишнього природного середовища, запобігання зміні клімату. Збільшення частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі України сприятиме процесу декарбонізації економіки, необхідному для виконання міжнародних зобов'язань країни щодо скорочення викидів парникових газів та сприятиме змен-

шенню наслідків запровадження Євросоюзом прикордонного вуглецевого податку (Carbon Border Adjustment Mechanism; CBAM) [1].

На сьогоднішній день, одним із найбільш перспективних напрямків відновлюваної енергетики є виробництво біогазу та біометану. Основними перевагами даного напрямку є широкий спектр видів сировини для виробництва біогазу/біометану та мультиваріантність їх використання – від комбінованого виробництва електричної та теплової енергії до виробництва рідких біопалив та зеленого водню. Разом з тим, існує певна межа в можливості використання ресурсів біомаси, і передусім – ресурсів сталої біомаси для виробництва передових біопалив та біогазу [2].

Відтак, існує потреба в пошуку видів сировини для біогазу, виробництво яких буде сталим, екологічно безпечним та відносно дешевим. Такою сировиною можуть стати мікроводорості, вирощені на побічному продукті виробництва біогазу – дигестаті, з використанням CO_2 , що міститься в біогазі. Біогаз та біометан, вироблений з мікроводоростей, відносяться до біопалив 3-го покоління. Мікроводорості є також серед переліку видів сировини для виробництва передових біопалив та біогазу в Директиві ЄС RED II (додаток 9), що дозволяє зараховувати подвійний облік енергії у виконанні зобов'язань зі скорочення використання викопних видів палив.

Метою роботи є огляд технологій та аналіз можливості впровадження технологій культивування мікроводоростей на біогазових/біометанових заводах, з отриманням додаткового виходу біогазу/біометану та корисним використанням дигестату.

Методи дослідження включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Вступ

Промислове виробництво біогазу в Україні почалось фактично з 2003 року, з появою першого комерційного проекту біогазової станції з КГУ на 160 кВтел на свинофермі компанії Агро-Овен в с. Оленівка, Дніпропетровської області. Сьогодні в Україні працює 83 біогазові установки [3], включаючи 33 установки дегазації полігонів та звалищ ТПВ, і їх кількість продовжує зростати. В поточному 2024 році уведено в експлуатацію перші проекти виробництва біометану в Україні, і очікується, що десятки нових установок будуть збудовані в близькій перспективі.

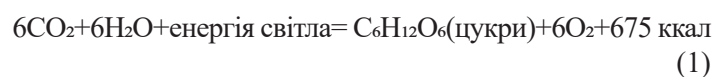
Потенціал виробництва біометану в Україні, враховуючи наявність найбільшої площі ріллі у Європі і, відповідно, значних обсягів побічної продукції та відходів сільськогосподарського походження, є одним з найвищих у світі. За оцінкою Біоенергетичної асоціації України, такий потенціал оцінюється в 21,18 млрд m^3CH_4 /рік [4], що складає близько 80% усього споживання природного газу в Україні в довоєнний 2021 рік. При цьому, потенціал може бути збільшено за рахунок таких факторів як збільшення урожайності основних культур, зміна структури виробництва, збільшення чисельності населення, а також за рахунок розширення переліку видів сировини новими.

В результаті процесу анаеробного зброджування утворюється біогаз, який в основному складається з метану, CO_2 та незначної кількості інших газів. Переважне поточне використання біогазу – для комбінованого

виробництва електричної та теплової енергії, останнім часом також і біометану. При цьому, при збагаченні біогазу до біометану, утворюється значна кількість газу CO_2 (від 0,5 до 0,9 nm^3CO_2 на кожен nm^3CH_4 в біогазі), який можна корисно утилізувати і, таким чином, додатково скоротити викиди парникових газів.

Ще одним продуктом анаеробного зброджування є дигестат – залишки сировини в формі концентрованої мінерально-органічної суспензії з середнім вмістом сухих речовин 3-8% та високим вмістом макро- та мікронутрієнтів в доступній для засвоєння мікроводоростями формі. За поточного використання видів та обсягів сировини для виробництва біогазу в Україні, середній вихід дигестату біогазових установок складає 1,8 т сирової маси на кожен вироблений МВт•год енергії біогазу або близько 39,1 тис. т на рік з розрахунку на 1 МВт встановленої електричної потужності когенераційної установки. В 2023 році на біогазових установках в Україні сумарно утворювалось 1,72 млн т сирового дигестату [3]. Близько 85-90% з цього обсягу складає рідка фракція дигестату після розділення на шнекових сепараторах, з вмістом сухих речовин на рівні 1-3%. Як правило, рідку фракцію вносять на поля як удобрювальний продукт, однак економічна доцільність такого внесення обмежується кількома кілометрами навколо біогазової станції. Підвищення економічної доцільності утилізації рідкої фракції дигестату є актуальною задачею для виробників біогазу. Вирощування мікроводоростей на дигестаті, з поверненням нерозділеної суспензії мікроводоростей для додаткового виробництва біогазу може бути одним з таких рішень.

Мікроводорості в 10-50 разів ефективніші з уловлювання CO_2 , ніж наземні рослини [5], і можуть фіксувати 1,83 тону CO_2 на 1 тону сухої маси МВ [6]. Фотосинтетичне перетворення неорганічного CO_2 в метаболічну енергію, яка зберігається у вигляді вуглеводів, білків і ліпідів, є фундаментальним для продуктивності водоростей. Мікроводорості, як і наземні рослини, ростуть і розмножуються за допомогою фотосинтезу. Фотосинтез – це процес, в якому енергія світла перетворюється на хімічну енергію шляхом поглинання атмосферного CO_2 відповідно до реакції (1):



Цукор, який утворюється в результаті фотосинтезу, перетворюється на інші клітинні компоненти (ліпіди, вуглеводи та білки), що утворюють клітинну масу водоростей. Мікроводорості можуть перетворювати сонячне

світло в хімічну енергію з високою фотосинтетичною ефективністю (6-8%), порівняно з наземною біомасою (1,8-2,2%) [7].

Ідея дослідження ґрунтується на гіпотезі про можливість ефективного вирощування МВ на живильному середовищі з дигестату, який містить в собі необхідні для росту МВ макро- та мікроелементи, з додаванням концентрованого CO_2 , отриманого від збагачення біогазу до біометану, та наступним перетворенням вирощеної біомаси МВ на біогаз та біометан. В результаті це дозволить, з допомогою процесу фотосинтезу, досягти більш повної конверсії органічного карбону, що міститься в сировині для виробництва біогазу, в газоподібний носій енергії – CH_4 .

Очікується, що ціна на біометан з МВ буде вищою, оскільки такий біометан вважається передовим згідно Директиви ЄС REDII (REDIII) та дозволяє досягати значних скорочень викидів парникових газів. При цьому, використання суспензії з вирощеними МВ для виробництва біогазу не потребуватиме обов'язкового концентрування біомаси МВ (відділення МВ від рідини), позаяк волога, що міститься в суспензії, може бути необхідним компонентом у технології анаеробного зброджування поживних решток, потенціал виробництва біогазу з яких складає близько 50% всього потенціалу. Відомо також, що співвідношення C:N в складі органічної речовини МВ є меншим 10, що не є оптимальним для анаеробного зброджування, але дозволить збалансовувати таке співвідношення у поєднанні з поживними рештками з C:N 50-100. Таким чином, впровадження технології вирощування мікроводоростей на біогазовому заводі з рециклом рідкої фракції дигестату з МВ дозволить зменшити витрати на логістику дигестату та використання свіжої води.

Виробництво мікроводоростей у ЄС та Україні

Біомаса водоростей, яка вже широко використовується в Азії як харчовий продукт, все частіше включається в західні раціони безпосередньо для споживання людиною або використовується в різноманітних харчових цілях. Мікроводорості також широко використовуються як харчові добавки, причому деякі види є важливими джерелами специфічних компонентів, таких як антиоксиданти, пігменти, олії та вітаміни. Станом на 2022 існує 87 підприємств з виробництва мікроводоростей у 17 країнах Європи [8].

Основними сферами застосування МВ у 2022 є виробництво харчових продуктів та добавок (23%), кормів (19%), косметики (19%), фармацевтики (8%), добрив та біостимуляторів (7%), що разом становить 76% від загального виробництва в ЄС [8]. Порівняно недавно МВ

були ідентифіковані та почали використовуватись як сировина для виробництва відновлюваних видів палив, таких як біодизель, біоетанол, біогаз, біоводень тощо.

На сьогодні лідерами в ЄС за кількістю підприємств, які культивують мікроводорості для різних цілей, є Німеччина, Іспанія та Італія [9]. Офіційна статистика щодо обсягів виробництва мікроводоростей майже відсутня в європейському масштабі, так приблизне виробництво складає 182 тонни сухої ваги мікроводоростей і 142 тонни спіруліни. *Chlorella spp.* та *H. pluvialis* є найбільш виробленими мікроводоростями з точки зору об'ємів, що відповідає понад 80% загальних обсягів [9]. Офіційна статистика по виробництву МВ в Україні відсутня, але відомо про декілька підприємств які вирощують *Chlorella* та *Arthrospira* для виробництва кормів та харчових добавок.

Заводи з біопереробки водоростей були досліджені як шлях оптимізації використання багатьох компонентів вихідної сировини для різних цілей. Крім того, якщо вони підключені до іншої промислової інфраструктури, підприємства з виробництва водоростей можуть корисно використовувати пов'язані ресурси (наприклад, воду, тепло) і функціонувати як джерело додаткових функцій, таких як очищення стічних вод. Очікується, що така синергія призведе до зменшення витрат та підвищить екологічну стійкість виробництва мікроводоростей, але необхідні подальші дослідження щодо оптимізації цього підходу [9].

Даний напрямок новий для України, але має потенціал до розвитку базуючись на стрімкому розвитку його в країнах ЄС та різноманітними можливими напрямками перероблення біомаси мікроводоростей у цінні продукти та енергію, одночасно знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище. В Україні дослідження біомаси мікроводоростей як альтернативного джерела сировини для виробництва біопалив було розпочато у 2009 році в рамках наукового проекту НАН України «Біомаса як сировина для палива». Дослідження були спрямовані на пошуку штамів МВ для виробництва біодизелю з біомаси [10,12,22].

У цілому в світі зареєстровано 22 колекції водоростей, що зберігаються в наукових установах Австралії, Америки, Японії, Китаю, Франції, Португалії, Іспанії, Англії, Німеччини, Чехії, Таїланду та України. В Україні наявні колекції мікроводоростей в Інституті ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (акронім IBASU-B – містить 138 штамів синьо-зелених водоростей та IBASU-A – 486 штамів водоростей, а також 250 штамів супутніх бактерій, ізольованих з культур водоростей) [23], Київському національному університеті імені

Тараса Шевченка (АСКУ – 540 штамів), а також Інституті гідробіології НАН України (акронім HPDP – 39 штамів водоростей) [24].

Мікрородості як сировина для виробництва біометану

Здатність мікрородостей вилучати з водного середовища сполуки азоту, фосфору та інших речовин визначається насамперед фізіологічними особливостями виду, зокрема інтенсивністю обміну речовин та потребою в елементах живлення для підтримання їх життєдіяльності. Дослідження [17] показали, що симбіотична взаємодія мікробних консорціумів може призвести до кращого виживання, видалення поживних речовин і виробництва біомаси, порівняно з процесами, в яких використовується лише один фототрофний або гетеротрофний мікроорганізм. Мікрородості в природному середовищі як правило ростуть та функціонують консорціумом різних штамів та ціанобактерій, де функціонують складні симбіотичні процеси обміну, асиміляції та продукування різноманітних речовин. Дослідження різних видів мікрородостей встановило, що вони можуть знизити понад 98% ХПК (хімічне споживання кисню) і БПК (біологічне споживання кисню) стічної води. Вплив біоремедіації на очищення стічних вод зменшує викиди парникових газів, утворення осаду і є економічно та енергетично ефективним [18].

Основні переваги використання МВ для виробництва біопалив:

1. Мікрородості можуть перетворювати сонячне світло в хімічну енергію з високою фотосинтетичною ефективністю (6%–8%) порівняно з наземною біомасою (1,8%–2,2%).
2. Відсутність конфлікту з харчовими ланцюгами людини чи тварин.
3. Високий вміст в біомасі МВ вуглеводів, білків і жирів.
4. МВ здатні рости у водних середовищах, таких як стічні, прісні та солоні води.
5. Створюють довгостроковий метод генерації O_2 і зменшення викидів CO_2 .
6. Цикл росту та культивування мікрородостей становить близько 15 днів, на відміну від сої або інших культур, для яких цей цикл становить один або два рази на рік.
7. МВ, якщо їх культивують на землі в ставках або фотобіореакторах для виробництва біогазу для транспорту та передового біопалива – сировина з Директиви ЄС RED II, Додаток 9, яка підлягає подвійному обліку (виробництво біопалив третього покоління). Подвійний

облік означає, що для врахування поставлених цілей енергетичний вміст біопалива виробленого з сировини, яка є у додатку 9, множиться на 2.

Напрямок очищення рідкої фракції дигестату шляхом вирощування на ньому мікрородостей (біоремедіація дигестату) виник, як розв'язання поточної проблеми евтрофікації в Північно-Західній Європі, де використання дигестату як добрива для ґрунту обмежене, що призвело до впровадження політики зон, вразливих до нітратів, визначених Європейською нітратною директивою 91/676/ СЄЕ, що обмежує щорічне навантаження азоту на орні землі [19, 21]. Амоній є основною поживною речовиною, що представляє інтерес для культивування мікрородостей, і підвищення його доступності з подальшим поглинанням і має вирішальне значення для оптимальної біоремедіації. При виробництві біодизелю, медичних чи косметичних продуктів з мікрородостей найбільша стаття затрат належить стадії виділення компонентів водоростей з культуральної рідини та виділення основного компонента з біомаси. Необхідне споживання енергії для сушіння становить близько 85% від загального споживання енергії в процесі виробництва біодизеля з мікрородостей [20]. Виробництво біометану з МВ не потребує стадії виділення основних компонентів, оскільки така біомаса придатна до анаеробного зброджування, і в такому процесі всі органічні речовини (білки, вуглеводи та ліпіди), присутні в біомасі мікрородостей, будуть перетворені на метан і вуглекислий газ [25].

Можна виділити кілька переваг виробництва біогазу з цілих мікрородостей:

- виробництво біогазу шляхом вологої ферментації не вимагає сушіння біомаси;
- мікрородості можна використовувати для підвищення якості біогазу, тобто біосеквстрації CO_2 ;
- види мікрородостей, які не здатні накопичувати ліпіди, також можуть використовуватися як сировина для виробництва біогазу;
- можливе спільне зброджування з іншими видами біомаси, такими як тверді або рідкі відходи.

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрородостей та їх присутність на біогазових установках наведені в таблиці 1.

З основних умов потрібних для вирощування мікрородостей наявні майже всі, окрім освітлення, що вирішується встановленням LED ламп.

Підбір виду мікрородостей для виробництва біогазу

Культивування мікрородостей може забезпечити синтез цілого ряду цінних хімічних сполук: білків, жирів, вуглеводів, вітамінів, антиоксидантів, ферментів,

Табл. 1. Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрободоростей та їх присутність на біогазових установках

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікрободоростей	Наявність на біогазових установках
Необхідне освітлення (сонячне або штучне як, наприклад, LED)	-/+ тільки літом
температура (15-30°C)	+
вода	+
вуглекислий газ (CO ₂)	+
мінеральні нутрієнти (N, P, K) Орієнтовно 1,8 т CO ₂ , 70 кг N, 10 кг P і 8 кг K потрібно для вирощування 1 т біомаси мікрободоростей [5]	+

пігментів тощо. Яка сполука буде домінувати в хімічному складі біомаси водоростей напряму залежить від конкретного типу мікрободоростей та умов культивування. Різні види МВ демонструють різну здатність виживати та розмножуватись при наявності певних сполук, наприклад аміаку, важких металів тощо. Як наслідок, підбір типу мікрободорості – це один з ключових факторів при розробці технології вирощування МВ на РФД. Для виробництва біогазу з біомаси МВ важливим є отримання максимальної продуктивності біомаси, та здатність до біорозкладання анаеробними бактеріями біомаси вирощеної на дигестаті біогазових установок. Від продуктивності біомаси та біорозкладності буде залежати вихід біометану з біомаси, а отже і економічна доцільність технології.

Оптимальним видом мікрободоростей для максимального виробництва біогазу є такий, який має [25]:

- тонку клітинну стінку або її відсутність;
- великі клітини;
- високу швидкість росту в нестерильних середовищах;
- високу питому стійкість до природних забруднень;
- клітинну стінку на основі вуглеводів.

Хоча вихід метану залежить від складу мікрободоростей, стійкість клітинної стінки вважається обмежувальним фактором для анаеробного зброджування мікрободоростей. Кінетика анаеробного зброджування значною мірою залежить від здатності до розкладання певного виду мікрободоростей. Низькі рівні виходу метану у певних дослідженнях були пов'язані з низькою деградацією клітин і великою кількістю залишків, які погано розкладаються при анаеробному зброджуванні. Відповідно до цих результатів мікрободорості, що легко розкладаються, не мали клітинної стінки або їх клітинна стінка складалась з білка, і не містила целюлозу/геміцелюлозу [25]. Теоретичний потенціал біометану становить 470-800 м³ СН₄/т СОР. Експериментальні

дослідження показали, що продуктивність по біометану може досягати 337, 450 або 587 м³ СН₄/т СОР [33]. Питомий вихід біогазу з різних типів мікрободоростей та хімічний склад наведено в Таб. 2 та 3.

У деяких джерелах [11, 16, 32] вихід метану з мікрободоростей пов'язують з хімічним складом біомаси, але з часом це виявилось помилковим твердженням. Експериментальні дані, зібрані з літератури не демонструють сильної кореляції між вмістом ліпідів, вуглеводів і білків, знайдених у різних видах водоростей, і виходом метану, отриманим різними авторами, тому простий склад біомаси водоростей дійсно не може бути основним і єдиним фактором при виборі найкращого штаму водоростей для виробництва біометану [25]. Вирішальний вплив на вихід метану матиме саме склад клітинної стінки та продуктивність вирощування біомаси. Більшість хлорофітів (зелених мікрободоростей) мають складні та жорсткі клітинні стінки, клітинна стінка містить компоненти, вбудовані в матрикс, що містить уронові кислоти разом з іншими нейтральними цукрами. 40% компонентів мікрободоростей легко доступні для виробництва біометану, решта 60% потребують попередньої обробки, щоб зробити внутрішньоклітинний вміст доступним [26].

Також у [26] повідомляють про 4 типи клітинних стінок відповідно до їх будови та складності. Більш висока стійкість оболонки до деградації для мікрободоростей пов'язана з наявністю спорополімероподібних біополімерів. Іншою неперетравлюваною сполукою в клітинній стінці мікрободоростей є альгенан, який є негідролізованим стійким біополімером, що складається з пов'язаних поліефіром довголанцюгових п-алкільних одиниць. Нерозкладний біополімер альгенан присутній у таких водоростях як *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus*, *Nannochloris*, що ускладнює виробництво з них біогазу, тому що для руйнування їхньої клітинної стінки буде потрібна попередня обробка і це призведе до збільшення операційних витрат [26].

Табл. 2. Хімічний склад різних видів мікроводоростей, % [27]

Вид	Білки	Вуглеводи	Жири	Нуклеїнові кислоти
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 – 56	10 – 17	12 – 14	3 – 6
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	–	1.9	–
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 – 18	21 – 52	16 – 40	–
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58	12 – 17	14 – 22	4 – 5
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2	–
<i>Spirogyra</i> sp.	6 – 20	33 – 64	11 – 21	–
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8	–
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6	–
<i>Euglena gracilis</i>	39 – 61	14 – 18	14 – 20	–
<i>Prymnesium parvum</i>	28 – 45	25 – 33	22 – 38	1 – 2
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3	–
<i>Porphyridium cruentum</i>	28 – 39	40 – 57	9 – 14	–
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63	8 – 14	4 – 9	2 – 5
<i>Spirulina maxima</i>	60 – 71	13 – 16	6 – 7	3 – 4,5
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11	5
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7	–

Табл. 3. Питомий вихід різних видів мікроводоростей отриманий в результаті батч тесту [27]

Вид	Температура, [°C]	Вихід біогазу, [л/кг ОР]	Вихід CH ₄ [л/кг ОР]	CH ₄ [%]
<i>Arthrospira platensis</i>	-	481 ± 14	293	61
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	-	587 ± 9	387	66
<i>Chlorella kessleri</i>	-	335 ± 8	218	65
<i>Chlorella vulgaris</i>	28 – 31		310 – 350	68 – 75
<i>Dunaliella salina</i>		505 ± 25	323	64
<i>Dunaliella</i>	35	420		
<i>Euglena gracilis</i>		485 ± 3	325	67
<i>Nanochloropsis</i> sp.	38	388	312	80.5
<i>Scenedesmus obliquus</i>		287 ± 10	178	62
<i>Arthrospira</i> sp.	38	556	424	76,3
<i>Arthrospira</i> sp.	35	-	310-320	-
<i>Arthrospira maxima</i>	35	190 – 340		
Mixed algae sludge (<i>Chlorella Scenedesmus</i>)	35 – 50		170 – 320	62 – 64

В результаті літературного пошуку для аналізу та підбору оптимальних видів було обрано 6 видів мікроводоростей, що є найбільш розповсюдженими в очищенні стічних вод та для виробництва біопалив, а саме: *Euglena gracilis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella* sp., *Scenedesmus*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Spirulina*

platensis. *Chlorella vulgaris* була першою водорістю, яка стала об'єктом інтенсивного промислового культивування. Проте в цілому ця водорість виявилась неоптимальною для виробництва біогазу, оскільки її клітини мають дуже міцну та хімічно стійку оболонку з шаром спорополеніну. Вдалішим об'єктом вия-

вився *Scenedesmus*, але обидва типи потребуватимуть попередньої обробки перед анаеробною ферментацією через структуру їх клітинних стінок [13].

Варто зазначити, що не дивлячись на складну КС, *Chlorella* демонструє найвищий показник швидкості росту та єдина витримує високі концентрації CO_2 в газах (40-100%) [14], що буде корисним для подачі в якості джерела вуглецю концентрованого CO_2 після збагачення біогазу до біометану. *Dunaliella* має просту клітинну стінку і з погляду біорозкладності є оптимальним варіантом для виробництва біогазу, але для оптимального росту потребує солоного середовища, тому потребуватиме додаткового додавання солей. *Chlamydomonas reinhardtii* широко обирається для експериментів з біопаливом через її переваги, такі як швидкий ріст, сильна адаптивність і легке вирощування. *Euglena gracilis* характеризується високою стійкістю до високих концентрацій азоту та фосфору, і відповідно до результатів експериментальних досліджень була встановлена її здатність ефективно видаляти сполуки азоту та фосфору з побутових стічних вод [15].

Отже, оптимальними стосовно такого фактора як біорозкладність виглядають види *Euglena gracilis* та *Chlamydomonas reinhardtii*, які мають менш складну КС і відсутність полімерів, що не розкладаються, і також здатні витримувати високі концентрації амонійного азоту, що важливо у випадку використання дигестату.

Дигестат для вирощування МВ

Біогазові станції, як правило, працюють безперервно протягом року, що обумовлює необхідність накопичення дигестату на періоди між осіннім та весняним внесеннями на поля. При тривалому зберіганні дигестату у відкритих резервуарах або лагунах пропорційно збільшуються викиди в атмосферу метану (до 5-10% його потенціалу в сировині). На більшості діючих біогазових установок, у т.ч. і в Україні, обробка «сирого» дигестату обмежується розділенням на рідку і тверду фракції. Подальша обробка дигестату потребує додаткових витрат, а тому повинна бути обґрунтованою. Сепарація призводить до утворення двох продуктів: 1) твердої фракції із вмістом сухої речовини 20-40%, збагаченої вуглецем та фосфором, та 2) рідкої фракції зі вмістом сухих речовин 1-8%, збагаченої азотом та калієм [16]. Низький вміст СР у РФД робить недоцільним її транспортування на далекі відстані. При відсутності полів для внесення РФД, необхідними є ефективні рішення по його утилізації, або значні площі для накопичення та зберігання. В цілому РФД має у своєму складі необхідні поживні речовини для вирощування МВ, але є деякі фактори, які можуть інгібувати МВ, і їх варто враховувати при підготовці дигестату до культивування МВ.

Властивості дигестату що можуть негативно вплинути на ріст біомаси мікроводоростей [28,29] :

1. Каламутність (вміст завислих речовин). Через перешкоджання проникненню світла, підвищена каламутність пригнічує утворення мікроводоростей внаслідок порушення процесу фотосинтезу.

2. Концентрація амонійного азоту та аміаку. В дигестаті залежно від сировини біогазової станції може бути різна концентрація амонійного азоту (1000–3000 мг/л), тоді як концентрації понад 100 мг/л є шкідливими для більшості штамів мікроводоростей. Вільний аміак може проходити через клітинну мембрану мікроорганізмів, розривати та лізувати клітини. Зменшення темпів росту водоростей на 77% відбувається для *Scenedesmus sp.* при підвищенні рівня вільного аміаку в дигестаті з 9 до 34 мг/л.

3. Недостатня кількість фосфору в дигестаті може вплинути на культивування мікроводоростей. Оптимальне для росту мікроводоростей співвідношення азот/фосфор становить на рівні 7.

4. Біосорбція та біоаккумуляція є основними механізмами, за допомогою яких водорості видаляють важкі метали з анаеробного рідкого дигестату. Марганець, нікель, мідь, молібден, залізо та цинк є необхідними для росту клітин водоростей як мікроелементи та кофактори у ферментативних реакціях. Важкі метали, концентрація яких перевищує граничні межі, негативно впливають на процес біоремедіації.

5. Наявність патогенів та сторонньої мікрофлори.

Основні етапи підготовки РФД до культивування МВ:

- фільтрування крізь паперовий або мембранний фільтр для видалення завислих речовин;
- розведення водою у 10-30 разів для зменшення кольоровості та концентрації амонійного азоту;
- знезараження або підбір типу або консорціуму МВ і бактерій здатного рости в нестерильних умовах;
- додавання необхідних елементів або ростових сумішей.

Фотобіореактори для культивування МВ

Системи масового виробництва мікроводоростей і ціанобактерій розділяються на три основних види: ставки, фотобіореактори (PBR), системи з біоплівки або їх комбінація. Хоча ставки відносно прості та недорогі порівняно з фотобіореакторами, вони потребують великої площі землі, неефективні щодо уловлювання викидів CO_2 , піддаються впливу несприятливих погодних умов (дощ, випаровування тощо), і можуть легко забруднюватися, що є недоліком для певних застосувань, таких як вирощування продуктів харчування та кормів.

Фотобіореактори надійніші, але значно дорожчі за розміром CAPEX та OPEX. Конструктивно біореактори є досить складними інженерними системами. Для забезпечення оптимальних умов росту мікробіодоростей необхідним є постійний контроль і підтримання на певному рівні цілого ряду параметрів: умов асептики, температурного режиму, pH, окисно-відновного потенціалу середовища, концентрації розчиненого кисню, забезпеченості вуглекислотою та основними поживними речовинами, швидкості руху рідини, інтенсивності перемішування. PBR конструюють з високим співвідношенням площі поверхні до об'єму культури для досягнення максимальної ефективності

освітлення. Однак той самий принцип призводить до втрат тепла за відсутності світла. Розуміння залежного від часу теплового балансу в PBR має вирішальне значення для точного прогнозування продуктивності [31].

PBR можливо класифікувати відповідно до їх конструкції, включаючи орієнтацію, механізму циркуляції культури, способу освітлення та конструкції, режиму роботи (періодичний/безперервний), режиму культивування тощо [30].

В промислових масштабах найбільш поширені є трубчасті системи, але кожна з систем має свої переваги та недоліки. Тип PBR доцільно підбирати відповідно до цілей проєкту, географії розташування, потреби в

Табл. 4. Порівняння різних систем фотобіореакторів та їх продуктивності [27, 26, 32]

Система PBR	Переваги	Недоліки	Продуктивність втрати біомаси, г/л*добу
Відкриті ставки	Економічність Легко чистити Низька енергомісткість Легко масштабуються Низькі затрати на обслуговування	Важко контролювати параметри Низька продуктивність біомаси Здатність до контамінації Потребує великої площі Неефективне змішування	0,03–0,2
Колонні PBR	Ефективний масообмін Ефективне змішування Легкість стерилізації Компактність Потенціал до масштабування Зменшене фото інгібування та фото окислення Низькі енергозатрати	Мала поверхня освітлення Дорожче ніж відкриті ставки Складність конструкції та матеріалів	0,5-10
Трубчасті PBR	Велика поверхня освітлення Підходять для розміщення на вулиці Хороша продуктивність Відносно недорогі Можливе масштабування Легкий контроль процесу Рівномірне перемішування Хороший контроль температури	pH градієнт Втрати Обростання на стінках Потребує значних площ Гідродинамічний стрес Можливість низького газообміну	0,35-1,5
Плоскі PBR	Велика поверхня освітлення Підходить для вуличного виконання Короткий світловий шлях Висока продуктивність біомаси Відносно недорогі Легко очищати Низький вміст кисню в системі	Важко масштабовані Важко контролювати температуру Ризик наростання плівки на стінках Можливість гідродинамічного стресу	1,5 - 28

масштабуванні. У випадку вирощування МВ на дигестаті такою ціллю є отримання максимальної продуктивності вирощування біомаси МВ. Переваги та недоліки різних систем фотобіореакторів та можлива продуктивність вирощування біомаси наведені в Таблиці 4. Найбільш доцільними є плоскопанельний PBR, оскільки саме в ньому можна отримати максимальну продуктивність біомаси 1,5-28 г/л*добу, скорочуючи світловий шлях (товщину) фотобіореактора.

Впровадження культивування МВ на біогазовому/ біометановому заводі

Впровадження технології вирощування мікроводоростей в існуючі біогазові установки видається найбільш ефективним технологічним рішенням для утилізації РФД. У квітні 2024 р. стартував дослідницький проєкт: «Виробництво передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок», який реалізується консорціумом наступних компаній з України та Великої Британії: Манчестерський університет (UK адміністративний керівник, технологічний лідер), ALGAECYTES LIMITED (UK, комерційний партнер), ПрАТ «МХП ЕКО ЕНЕРДЖІ» (Україна, комерційний партнер) та Громадська спілка «Біоенергетична асоціація України» (науковий партнер). Проєкт переміг у конкурсі InnovateUkraine, який фінансується UK International Development та організований посольством Великої Британії в Україні. Основною метою проєкту є створити:

1. Новий економічний та енергоефективний процес культивування мікроводоростей на дигестаті біогазових станцій.

2. Новий економічний та енергоефективний процес виробництва біометану за допомогою анаеробного зброджування (AD) зібраних мікроводоростей.

На Рис. 1 показана схема інтеграції культивування МВ на БГУ, яка досліджуватиметься у згаданому

проєкті InnovateUkraine. Дигестат після анаеробного зброджування в БГУ розділяється на сепараторі на тверду та рідку фракцію. Рідку фракцію направляють у фотобіореактор для вирощування МВ. Культуральну суміш з біомасою МВ подають на змішування з основою сировиною перед подачею в БГУ.

Щоб досягти рентабельного виробництва передового біометану з мікроводоростей, собівартість виробництва мікроводоростей має становити менш ніж 0,2 євро/кг СР мікроводоростей. Цього планується досягнути впроваджуючи наступні заходи :

- використання дигестату біометанових установок як джерела вільного вуглецю, поживних речовин і тепла для культивування мікробіодоростей;
- використання CO_2 , який є відходом виробництва біометану, для культивування МВ;
- збільшення продуктивності вирощування мікробіодоростей в PBR до 5 г СР/(л*добу) шляхом використання тонкошарових плоских PBR;
- зниження енергоспоживання при виробництві біомаси водоростей до 0,02 кВт*год/кг СР водоростей внаслідок використання скидного тепла та CO_2 для процесу та значного зменшення потреб у зневодненні мікробіодоростей у разі їх використання для виробництва біометану;
- збільшення вартості біометану шляхом зниження коефіцієнта вуглецевої інтенсивності виробленого біометану (до від'ємних значень) внаслідок утилізації CO_2 для культивування мікробіодоростей;

Інтеграція вирощування мікроводоростей у технологію анаеробного зброджування і виробництва біометану є найбільш ефективним і перспективним способом вирощування мікроводоростей, оскільки більшість необхідних для цього компонентів, таких як технологічне тепло, CO₂, поживні речовини, вода, транспортування мікроводоростей для кінцевого використан-

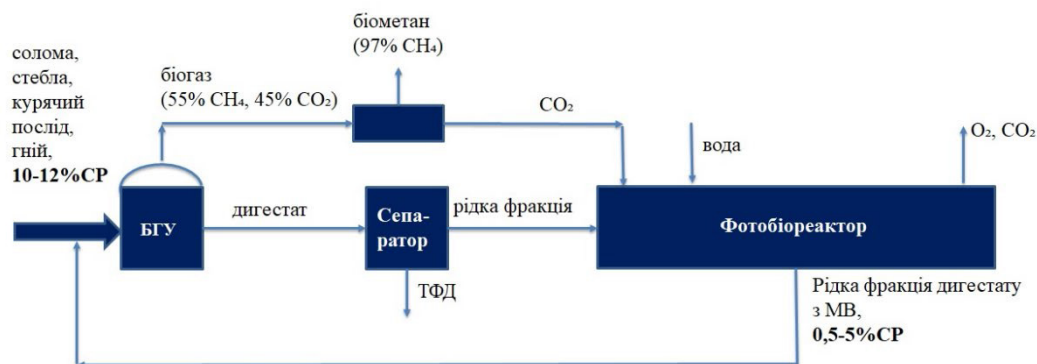


Рис. 1. Схема інтеграції культивування МВ на біогазовому/біометановому заводі

ня, є майже безкоштовними. Єдині витрати залишаються небезкоштовними - на електроенергію для освітлення, але їх можна мінімізувати, використовуючи сонячну електроенергію, накопичувачі енергії та електроенергію з біогазу. Потенційно внаслідок анаеробного зброджування біомаси водоростей можна збільшити річне виробництво біометану на діючій установці на 9,4 %, як було розраховано для аналогічного проекту у Швеції [33].

Висновки

Мікрроводорості демонструють високу фотосинтетичну ефективність і врожайність (майже вдвічі більшу, ніж у наземних рослин) і є перспективними для виробництва біоенергії, в першу чергу біогазу і біометану. У найближчій перспективі існують можливості використання мікрроводоростей в інтегрованому біопереробному заводі для виготовлення більш цінних харчових продуктів, кормів, нутрицевтики та олеохімічних біопродуктів. Потреби в ресурсах (вода, земля, світло, тепло, джерело CO₂) і поживних речовинах (N, P, K) залишаються ключовими проблемами економічної та екологічної ефективності процесу вирощування мікрроводоростей, інтеграція якого в біометанові установки представляється найбільш життєздатною стратегією.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року.* https://sae.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAE_21_09_2022.pdf
2. *Biomethane: Setting a target that is fit for food and the climate – An analysis of biomethane feedstocks to help fast forward sustainable energy and food system transformation*, Rijswijk, 2023 the Netherlands: Feedback EU.
3. *EBA Statistical Report 2023.*
4. *Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Кучерук П.П.* Перспективи виробництва передових біопалив в Україні. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. Т. 76, № 3. С.71-82. <https://www.etars-journal.org/index.php/journal/issue/view/37/40>
5. *Wang B., Li Y., Wu N. and Lan C. Q.* CO₂ biomitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol.79(5), P. 707-718. DOI: 10.1007/s00253-008-1518-y

6. *Chisti Y.* Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol.25(3), P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
7. *Di Caprio F., Altamari P., Pagnanelli F.* New strategies enhancing feasibility of microalgae cultivations. *Catalysis, Green Chemistry and Sustainable Energy. New technologies for novel business opportunities.* Elsevier Science. 2020. Vol.179, P.287-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00016-1>
8. *Vazquez Calderon, F., Sanchez Lopez, J.,* An overview of the algae industry in Europe. Producers, production systems, species, biomass uses, other steps in the value chain and socio-economic data, Guillen, J., Avraamides, M. editors, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/813113, JRC130107.
9. *Rita Araújo, Fatima Vázquez Calderón, Javier Sánchez López, Isabel Costa Azevedo, Annette Bruhn, Silvia Fluch, Manuel Garcia Tasende, Fatemeh Ghaderi Ardakani, Tanel Ilmjärvi, Martial Laurans, Micheal Mac Monagail, Silvio Mangini, César Peteiro, Céline Rebours, Tryggvi Stefansson, Jörg Ullmann.* Current Status of the Algae Production Industry in Europe. An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.626389/full>
10. *Petro M. Tsarenko, Olena V. Borysova, Vitaly I. Korkhovy and Yaroslav B. Blume.* High-Efficiency Ukrainian Strains of Microalgae for Biodiesel Fuel Production (Overview). *The open agriculture journal*. (2020). URL: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/14/PAGE/209/FULLTEXT/>
11. *Sialve B., Bernet N. and Bernard O.* Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances* 2009. Vol.27(4), 409-16, ISSN: 0734-9750
12. *Sorochinsky B, Blume Ya, Sozinov O.* Liquid Biofuels: Current state and tendencies 2010.
13. *Kostikov I. Yu., Tsarenko P.M.* Algology. manuscript of a textbook for students of the 3rd-4th year of the "Botany" specialty. — Kyiv, 2009-2013. — 377 p. <https://docplayer.net/71246758-Kostikov-i-yu-careno-p-m-algologiya-rupokis-pidruchnika-dlya-studentiv-3-4-kursu-specialnosti-botanika.html>
14. *Marcia Morales, León Sánchez, Sergio Revah.* The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. *FEMS Microbiology Letters*, Volume 365, Issue 3, 2018 <https://academic.oup.com/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>

15. I. Nezbyrsky, S. Shamanskyi, L. Pavliukh, S. Boichenko, Z. Gorbunova, O. Horbachova, V. Repeta. Removal of Biogenic Compounds from Sewage Water in a Culture of *Euglena Gracilis* (EUGLENOPHYTA). *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_9
16. Bernhard Drosch et al. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing / IEA Bioenergy*, 2015
17. Shousong Zhu, Lauren Higa, Antonia Barela, Caitlyn Lee, Yinhua Chen, Zhi-Yan Du. Microalgal Consortia for Waste Treatment and Valuable Bioproducts. *Energies* 2023, 16, 884. <https://doi.org/10.3390/en16020884>
18. Radhakrishnan Vandana. Suchitra Rakesh. *Phyco-Remediation of Sewage Wastewater by Microalgae*. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85343#B24>
19. Fuchs, W. Drosch, B. Assessment of the State of the Art of Technologies for the Processing of Digestate Residue from Anaerobic Digesters. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 1984–1993.
20. Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J. P. and Bernard O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science and Technology*. 2009. 43(17). 6475-81. 2009. ISSN: 1520-5851
21. Fernandes, F. Silkina, A. Gayo-Peláez, J. I. Kapoore, R. V. de la Broise, D. Llewellyn, C. A. Microalgae Cultivation on Nutrient Rich Digestate: The Importance of Strain and Digestate Tailoring under PH Control. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5429. <https://doi.org/10.3390/app12115429>
22. Tsarenko P., Borysova O., Blume Ya. Microalgae as bioenergetic object: IBASU-A collection species – perspective producers of biomass as the source of raw stuff for biofuel. *Visnyk Nat Acad Sci Ukraine* 2011; 5: 49-54.
23. О.В. Борисова, П.М. Царенко, М.О. Коніщук, О.В. Бурова. Мікрроводорості колекції IBASU-A Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України /. Київ, 2020. 131 с. URL: https://www.botany.kiev.ua/doc/mikrovod_IBASU-A_2020.pdf
24. Білоус О. П., Незбрицька І. М., Ключенко П. Д., Кірпенко Н. І. Колекція культур мікрроводоростей HPDP. – Київ, 2018. – 36 с.
25. Álvaro Torres, Fernando G. Fermoso, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja, David Jeison. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. *Biodegradation. Engineering and Technology*. (2013) URL: <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
26. Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez. *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts (Enhanced Edition) From Feedstock Cultivation to End-Products*. United Kingdom: Elsevier Science, 2017. P. 540
27. Jerry D Murphy, Bernhard Drosch, Eoin Allen, Jacqueline Jerney, Ao Xia, Christiane Herrmann. A perspective on algal biogas. *IEA Bioenergy*. 2015. URL: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/AD_of_Algae_ebook_end.pdf
28. Ahmed Tawfik, Mohamed Eraky, Nawaf S. Alhajeri, Ahmed I. Osman & David W. Rooney. Cultivation of microalgae on liquid anaerobic digestate for depollution, biofuels and cosmetics: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-022-01481-2>
29. Serna-García R, Ruiz-Barriga P, Noriega-Hevia G et al. Maximising resource recovery from wastewater, grown microalgae and primary sludge in an anaerobic membrane co-digestion pilot plant coupled to a composting process. *Journal of Environmental Management*. 2021 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720318156?via%3Dihub>
30. Anas Al-Dailami, Iwamoto Koji, Imran Ahmad I, Masafumi Goto. Potential of Photobioreactors (PBRs) in Cultivation of Microalgae. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2022. Vol. 27. No. 1. P. 32-44 <https://doi.org/10.37934/araset.27.1.3244>
31. Giovanna Salbitani, Simona Carfagna. Ammonium Utilization in Microalgae: A Sustainable Method for Wastewater Treatment. *Sustainability* 2021, Vol. 13(2), P. 956; <https://doi.org/10.3390/su13020956>
32. Amos Richmond. *Handbook of Microalgae Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd. URL: <https://alगतex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>
33. Xiaoqiang Wang, Eva Nordlander I, Eva Thorin and Jinyue Yan. Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: a case study in Sweden. *International Conference on Applied Energy, ICAE*. 2012. China ID: ICAE2012- A10560

OPPORTUNITIES OF ADVANCED BIOMETHANE PRODUCTION FROM MICROALGAE GROWN ON BIOGAS PLANT DIGESTATE. Part 1.

Geletukha G.G.¹, Hyvel M.M.², Kucheruk P.P.³

¹Dr.Sci., Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057 geletukha@uabio.org, <https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>

²Master's degree, LLC"SEC"Biomass"03067,street Maria Kapnist, 2A, Kyiv,03057,Ukraine, consultant, hyvel@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-8740-714X>

³PhD, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, senior researcher, kucheruk@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>

The purpose of the work is to review technologies and analyze the possibility of introducing microalgae cultivation at biogas/biomethane plants while simultaneously obtaining of additional biomethane yield and utilization of the liquid fraction of the digestate. Modern technologies, types and equipment for growing microalgae on the liquid fraction of digestate of biogas plants were considered and analyzed. The current situation of biogas/biomethane production in Ukraine and disposal of the liquid digestate fraction is presented. The chemical composition of the digestate and the methods of its preparation for the cultivation of microalgae were analyzed. Recommendations and a block scheme for technology implementation at a biogas/biomethane plant have been developed. Today, one of the most economically profitable options for Ukraine is the production of biomethane. On the other hand, there is a clear need for innovative, low-cost, safe production of biomethane using alternative, high-yield biomass that can utilize waste feedstock and also sequester carbon. Microalgae is a promising biomass that can convert nutrient-rich digestate into valuable biomass for biofuel and biodiesel production and is considered as a double-counting feedstock (RED II Directive, Annex 9). Microalgae demonstrate high photosynthetic efficiency and productivity (almost twice that of terrestrial plants) and are promising for advanced biomethane production. Integrating microalgae harvesting into an anaerobic digestion plan is the most efficient and promising way to harvest microalgae, as most of the components required for microalgae harvesting are almost free under the following conditions:

process heat, CO₂, nutrients, water, transport of microalgae to end use. Electricity alone for lighting is not free, but can be minimized by using solar energy, energy storage and biogas electricity. Algae biomass can potentially increase the annual production of biomethane at an existing plant by 9.4%, as was achieved for a similar project in Sweden [33].

References 33, table 4, figures 1.

Key words: biogas, advanced biomethane, microalgae, digestate purification, production of third generation biofuels.

1. *Natsionalnyi plan diy z rozvutky vidnovlyvanoj energetyky na period do 2030 roky*. [National action plan for the development of renewable energy for the period up to 2030]. (Ukr.) https://sae.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAE_21_09_2022.pdf

2. *Biomethane: Setting a target that is fit for food and the climate – An analysis of biomethane feedstocks to help fast forward sustainable energy and food system transformation*, Rijswijk, 2023 the Netherlands: Feedback EU.

3. *EBA Statistical Report 2023*.

4. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Kucheruk P.P.* Perspektyvy vyrobnytstva peredovykh biopalyv v Ukraini [Prospects for the production of advanced biofuels in Ukraine]. *Energy Technologies and Resource Saving*. – V. 76, № 3 (2023), P. 71-82. (Ukr.) <https://www.eters-journal.org/index.php/journal/issue/view/37/40>

5. *Wang B., Li Y., Wu N. and Lan C. Q.* CO₂ biomitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol.79(5), P. 707-718. DOI: 10.1007/s00253-008-1518-y

6. *Chisti Y.* Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol.25(3), P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

7. *Di Caprio F, Altamari P, Pagnanelli F.* New strategies enhancing feasibility of microalgae cultivations. *Catalysis, Green Chemistry and Sustainable Energy. New technologies for novel business opportunities*. Elsevier Science.2020. Vol.179, P.287-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00016-1>

8. *Vazquez Calderon, F., Sanchez Lopez, J.*, An overview of the algae industry in Europe. Producers, production systems, species, biomass uses, other steps in the value chain and socio-economic data, Guillen, J., Avraamides, M. editors, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/813113, JRC130107.

9. Rita Araújo, Fatima Vázquez Calderón, Javier Sánchez López, Isabel Costa Azevedo, Annette Bruhn, Silvia Fluch, Manuel Garcia Tasende, Fatemeh Ghaderi Radakani, Tanel Ilmjärvi, Martial Laurans, Micheal Mac Monagail, Silvio Mangini, César Peteiro, Céline Rebours, Tryggvi Stefansson, Jörg Ullmann. Current Status of the Algae Production Industry in Europe. An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.626389/full>
10. Petro M. Tsarenko, Olena V. Borysova, Vitaly I. Korkhovy and Yaroslav B. Blume. High-Efficiency Ukrainian Strains of Microalgae for Biodiesel Fuel Production (Overview). *The open agriculture journal*. (2020). URL: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/14/PAGE/209/FULLTEXT/>
11. Sialve B., Bernet N. and Bernard O. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances* 2009. Vol.27(4), 409-16, ISSN: 0734-9750
12. Sorochinsky B, Blume Ya, Sozinov O. Liquid Biofuels: Current state and tendencies 2010.
13. Kostikov I.Yu., Tsarenko P.M. Algology. manuscript of a textbook for students of the 3rd-4th year of the "Botany" specialty. — Kyiv, 2009-2013. — 377 p. <https://docplayer.net/71246758-Kostikov-i-yu-careno-p-m-algologiya-rukopis-pidruchnika-dlya-studentiv-3-4-kursu-specialnosti-botanika.html>
14. Marcia Morales, León Sánchez, Sergio Revah. The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. *FEMS Microbiology Letters*, Volume 365, Issue 3, 2018 <https://academic.oup.com/femsle/article/365/3/fnx262/4705896?searchresult=1>
15. Nezbyrsky, S. Shamanskyi, L. Pavliukh, S. Boichenko, Z. Gorbunova, O. Horbachova, V. Repeta. Removal of Biogenic Compounds from Sewage Water in a Culture of *Euglena Gracilis* (EUGLENOPHYTA). *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_9
16. Bernhard Drosig et al. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing / IEA Bioenergy, 2015
17. Shousong Zhu, Lauren Higa, Antonia Barela, Caitlyn Lee, Yinhua Chen, Zhi-Yan Du. Microalgae Consortia for Waste Treatment and Valuable Bioproducts. *Energies* 2023, 16, 884. <https://doi.org/10.3390/en16020884>
18. Radhakrishnan Vandana. Suchitra Rakesh. Phyco-Remediation of Sewage Wastewater by Microalgae. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85343#B24>
19. Fuchs, W. Drosig, B. Assessment of the State of the Art of Technologies for the Processing of Digestate Residue from Anaerobic Digesters. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 1984–1993.
20. Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J. P. and Bernard O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science and Technology*. 2009. 43(17). 6475-81. 2009. ISSN: 1520-5851
21. Fernandes, F. Silkina, A. Gayo-Peláez, J.I. Kapoore, R.V. de la Broise, D. Llewellyn, C.A. Microalgae Cultivation on Nutrient Rich Digestate: The Importance of Strain and Digestate Tailoring under PH Control. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5429. <https://doi.org/10.3390/app12115429>
22. Tsarenko P, Borysova O, Blume Ya. Microalgae as bioenergetic object: IBASU-A collection species – perspective producers of biomass as the source of raw stuff for biofuel. *Visnyk Nat Acad Sci Ukraine* 2011; 5: 49-54.
23. O.V. Borisova, P.M. Tsarenko, M.O. Konishchuk, O.V. Burova. Microvodorosti colections IBASU-A Instytutu botaniku imeni M.G. Holodnogo Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy [Microalgae of the IBASU-A collection of the Institute of Botany named after M.G. Kholodnoy National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2020. 131 p. (Ukr.) URL: https://www.botany.kiev.ua/doc/mikrovod_IBASU-A_2020.pdf
24. Bilous O. P., Nezbyrsky I. M., Klochenko P. D., Kirpenko N. I. Kolektsia kultur mikrovdorostey HPDP. [HPDP microalgae culture collection.] - Kyiv, 2018. - 36 p. (Ukr.)
25. Álvaro Torres, Fernando G. Fermo, Bárbara Rincón, Jan Bartacek, Rafael Borja, David Jeison. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Digestion. *Biodegradation. Engineering and Technology*. (2013) URL: <https://www.intechopen.com/chapters/45072>
26. Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez. Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts (Enhanced Edition) From Feedstock Cultivation to End-Products. United Kingdom: Elsevier Science, 2017. P. 540
27. Jerry D Murphy, Bernhard Drosig, Eoin Allen, Jacqueline Jerney, Ao Xia, Christiane Herrmann. A perspective on algal biogas. *IEA Bioenergy*. 2015. URL: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/AD_of_Algae_ebook_end.pdf
28. Ahmed Tawfik, Mohamed Eraky, Nawaf S. Alhajeri, Ahmed I. Osman & David W. Rooney. Cultivation of microalgae on liquid anaerobic digestate for depollution, biofuels and cosmetics: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-022-01481-2>

29. Serna-García R, Ruiz-Barriga P, Noriega-Hevia G et al. Maximising resource recovery from wastewater, grown microalgae and primary sludge in an anaerobic membrane co-digestion pilot plant coupled to a composting process. *Journal of Environmental Management*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720318156?via%3Dihub>
30. Anas Al-Dailami, Iwamoto Koji, Imran Ahmad I, Masafumi Goto. Potential of Photobioreactors (PBRs) in Cultivation of Microalgae. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2022. Vol. 27. No. 1. P. 32-44 <https://doi.org/10.37934/araset.27.1.3244>
31. Giovanna Salbitani, Simona Carfagna. Ammonium Utilization in Microalgae: A Sustainable Method for Wastewater Treatment. *Sustainability* 2021, Vol. 13(2), P. 956; <https://doi.org/10.3390/su13020956>
32. Amos Richmond *Handbook of Microalgae Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd. URL; <https://algaetex.org/ebook/Handbook%20of%20microalgal.pdf>
33. Xiaoqiang Wang, Eva Nordlander I, Eva Thorin and Jinyue Yan. Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: a case study in Sweden. *International Conference on Applied Energy, ICAE*. 2012. China ID: ICAE2012- A10560

Отримано 08.08.2024

Received 08.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 628.23

ВИДАЛЕННЯ АМІАКУ ЗІ СТИЧНИХ ВОД ЗВАЛИЩ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ МЕТОДОМ ВІДДУВАННЯ

Петрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Бадеха А.В.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: badekha@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3903-3766><https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.8>

Актуальність роботи обумовлена необхідністю очищення стічних вод звалищ твердих побутових відходів. Ефективним заходом у донному напрямку є метод зворотного осмосу поєднаний з технологією передмембранного очищення з використанням вапнування. В результаті проведених досліджень з виділення аміаку в промислових стічних водах з подальшим його уловленням для отримання амонійних добрив.

The relevance of the work is due to the need to treat wastewater from solid waste landfills. An effective measure in the bottom direction is the method of reverse osmosis combined with the technology of pre-membrane treatment using liming. As a result of research on the separation of ammonia in industrial wastewater and its subsequent capture to produce ammonium fertilisers.

Бібл. 6, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: стічні води, тверді побутові відходи, аміак, добрива.

C_{aa} – концентрація амонійного азоту, мг/дм³;
 τ – час, хв;

Т – температура, °С.

Вступ

Постановка проблеми. Вода є незмінним і абсолютно обов'язковим учасником практично усіх біохімічних – конструктивних, енергетичних, структурних, інформаційних (одержання, зберігання, використання інформації) тощо – реакцій у будь-якому суцільному на Землі організмі [1].

Проблема очищення стічних вод (фільтратів) звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) відноситься до найбільш гострих проблем загальнодержавного значення. Фільтрати звалищ ТПВ становлять серйозну загрозу навколишньому середовищу внаслідок масштабного та неконтрольованого забруднення підземних та поверхневих вод. Зазначені фільтрати відносяться до занадто забруднених, екологічно небезпечних стічних вод, оскільки характеризуються високим вмістом солей (до 25000 мг/дм³) та органічних речовин (ГПК – 13000–16000 мг О/дм³). На сьогоднішній день в Україні фільтрати звалищ, як правило, не очищаються і потрапляють у поверхневі та підземні води без будь-якої обробки, чим завдається величезної шкоди навколишньому середовищу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У промислово розвинених країнах світу для очищення фільтратів звалищ ТПВ широко використовують

метод зворотного осмосу. Так, очищення води оберненим осмосом вимагає на 25 - 30% менше енерговитрат, ніж іншими методами. Крім того, зворотний осмос забезпечує високий рівень очищення води від більшості типів забруднень. Разом з тим ефективність та економічність зворотного осмосу багато в чому визначається адекватним попереднім очищенням фільтрату, що запобігає забрудненню мембран. У багатьох випадках з метою економії при очищенні фільтратів звалищ ТПВ цього не дотримуються.

В Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. О.В. Думанського НАН України розроблено та випробувано декілька варіантів технології попереднього очищення (перед зворотним осмосом) фільтратів звалищ ТПВ, один з яких включає такі технологічні процеси, як коагуляцію вапнуванням з подальшим відстоюванням, віддування аміаку, механічне фільтрування, нанофільтрацію [2].

Цей варіант технології пройшов випробування на дослідному обладнанні, змонтованому на полігоні № 5 звалища ТПВ у с. Б. Дмитровичі Київської обл. Хімічний склад фільтрату зазначеного звалища представлений у [3]. Проведені випробування щодо попереднього очищення фільтрату зазначеного звалища показали реальність застосування запропонованої технології

та виявили деякі недоліки, що в основному стосуються недосконалості конструкції окремих вузлів обладнання, що випробовується. Зокрема, через недостатню ефективність вузла віддування аміаку, його подальше видалення на стадії нанофільтрації та зворотного осмосу не забезпечувало вимог щодо концентрації аміаку у воді, що підлягає скиданню в каналізацію.

Метою роботи є результати лабораторних досліджень процесу віддування аміаку з метою отримання кількісних закономірностей, необхідних для подальшого конструювання відповідного обладнання та визначення необхідних технологічних режимів.

Матеріали та методи досліджень

Лабораторні експерименти з дослідження процесу віддування аміаку проводили за допомогою обладнання, зображеного на рис. 1.

Процес віддування здійснювали в склянці реактора-дегазатора 7, герметично з'єднаного з півкулею піноуловлювача 6. Склянка реактора-дегазатора являв собою циліндр об'ємом 200 см³. Півкуля піноуловлювача мала об'єм близько 2 дм³. Склянка реактора-дегазатора була опущена в робочу ємність 9 ультратермостата таким чином, що рівень досліджуваної рідини в склянці знаходився нижче рівня термостатуючої рідини (води) термостата. Повітря для віддування аміаку подавали компресором 1 по трубці 5 і барботировали в досліджувану рідину за допомогою барботера 8.

Необхідний потік повітря регулювали кранами 2 і 3, і контролювали реометром 4. циліндра. Вимірювання показали, що відхилення не перевищували 5% даних, вказаних на шкалі реометра.

Методика проведення експериментів така. 200 см³ вихідного фільтрату обробляли відповідними дозами оксиду кальцію з перемішуванням протягом 1,5 год. При цьому колба, в якій здійснювали перемішування, була накрита фарфоровою чашкою з метою зменшення втрат аміаку суміші в процесі перемішування. Після завершення перемішування суміш відстоювали протягом 5 хв. Освітлену рідину, що утворилася над осадам сполук кальцію та інших завислих речовин, акуратно зливали в мірний циліндр і переносили в склянку реактора-дегазатора (рис. 1), витримували деякий час до вирівнювання температури рідини, що досліджується, з температурою води термостата. Після цього включали компресор, який продував повітря через рідину у склянці реактора-дегазатора, розпорошуючи його за допомогою спеціального барботера. Процес барботування супроводжувався інтенсивним піновиділенням, тому до верхньої частини склянки реактора-дегазатора був прибудований піноуловлювач. Об'ємний потік повітря, що подається до дегазатора, становив 7,5 дм³/хв.

У процесі продування повітря через суміш зі склянки реактора-дегазатора в певні проміжки часу піпеткою відбирали проби об'ємом 1 см³ для аналізу вмісту амонійного азоту. Сам аналіз здійснювався за методикою [4], тобто світлопоглинання комплексу, утвореного реактивом Несслера. Вимірювання величини світлопоглинання (або оптичної щільності) виконували за допомогою двоплечового фотоелектрокалориметра ФЕК -56 М. Використання цього приладу дозволяло знижувати внесок похибки, що вноситься забарвлення розчину реактиву Несслера. Це досягалося шля-

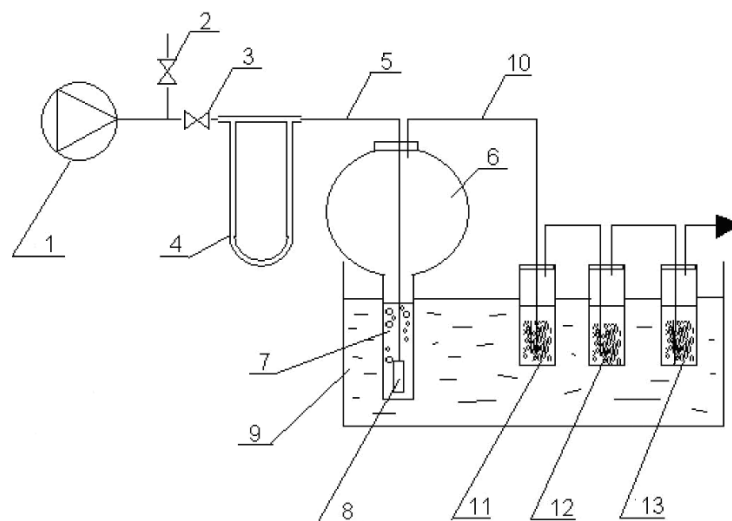


Рис. 1. Принципова схема лабораторної установки з віддувки та уловлювання аміаку: 1-компресор; 2, 3-крани; 4-реометр; 5, 10-з'єднувальні трубки; 6-піноуловлювач; 7-реактор-дегазатор; 8-барботер; 9-ємність термостата; 11-13-поглиначі аміаку

хом використання відповідно розведеного реактиву в одній із порівняльних кювет приладу (в іншій кюветі був досліджуваний розчин відповідної концентрації). З іншого боку, саме розведення досліджуваного розчину при аналізі було настільки значним, що власне забарвлення реактиву Несслера не могло внести істотних похибок результати аналізу.

За зазначеною методикою вміст амонійного азоту визначали у вихідній стічній воді, яку досліджували, та в суміші, отриманій після обробки оксидом кальцію через 1,5 год. перемішування. За час перемішування концентрація аміаку в суміші дещо зменшувалась через його летючість. Згадані втрати аміаку кількісно визначені у проведених експериментах.

Результати дослідження

Так як у технології передмембранного очищення з використанням вапнування відбувається значне підвищення величини рН розчину безпосередньо після введення вапна, то це явище доцільно використовувати для віддування аміаку. З метою запобігання викидам аміаку в атмосферу одночасно з віддуванням необхідно застосовувати методи його уловлювання з урахуванням можливої подальшої утилізації (в даному випадку – виробництво амонійних добрив). Віддування і уловлювання аміаку відомі в технологіях коксохімії та виробництва соди, але, враховуючи специфічність даної задачі, про яку було сказано вище, виникла необхідність проведення спеціальних експериментів з віддування і вловлювання аміаку безпосередньо з реальних стічних вод фільтрату звалища ТПВ на полігоні №5.

Оскільки у варіанті розроблюваної технології очищення фільтрату звалища з використанням коагуляції гідроксидом кальцію величина рН оброблюваної води

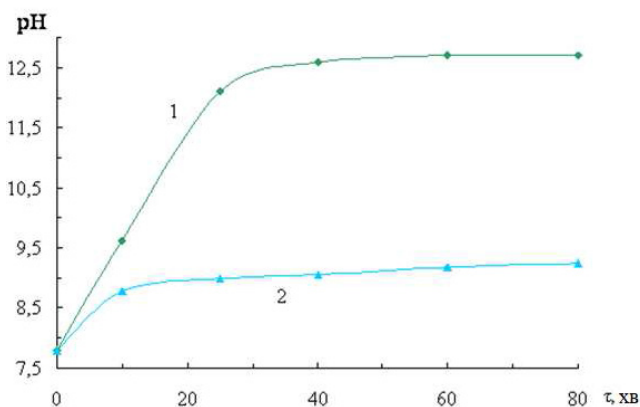


Рис. 2. Зміна рН фільтрату, обробленого оксидом кальцію (5 мг/дм^3 (1), 1 мг/дм^3 (2)) у процесі перемішування

регулюється шляхом дозування оксиду кальцію, виникла потреба експериментально встановити залежність величини рН стічної води від введеної дози оксиду кальцію. Враховуючи слабку розчинність оксиду кальцію у воді і, відповідно, малу швидкість процесу його розчинення, проведено вимірювання залежності зміни рН стічної води від часу після введення до неї відповідної дози оксиду кальцію та перемішуванні магнітною мішалкою зі швидкістю обертання 400-500 об./хв. Величину рН стічної води вимірювали за допомогою універсального іоніміру ЕВ-74.

Для малих доз оксиду кальцію ($1\text{--}5 \text{ мг/дм}^3$) час для встановлення постійного значення рН у зазначених умовах становив не більше 1 години. Результати цих вимірів представлені на рис. 2.

На рис. 3 показана залежність концентрації амонійного азоту у суміші від часу проведення віддування. Три криві, представлені малюнку, відповідають трьом різним температурам сумішей, у яких здійснювалася отдувка.

Криві, наведені на рис. 3 показують, що протягом 1 ч. віддування концентрація амонійного азоту в досліджуваній суміші зменшувалася в 6-8 разів. Слід нагадати, що об'ємна швидкість (V) пропускання повітря через досліджуваний розчин підтримувалася постійною, отже тривалість (τ) процесу віддування в умовах проведених експериментів відповідає кратності пропущеного об'єму повітря (V) по відношенню до вихідного об'єму (V_0) оброблюваного розчину ($\cdot$).

При проведенні аналогічних експериментів, в яких обробка фільтрату здійснювалася меншими дозами оксиду кальцію ($1,0 \text{ мг/дм}^3$), що створювало

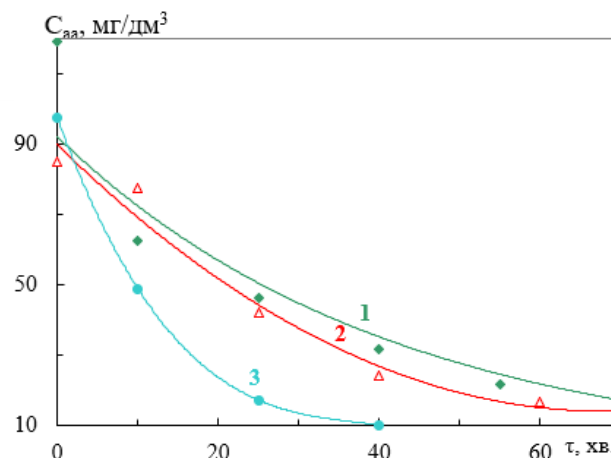


Рис. 3. Зміна концентрації амонійного азоту $C_{ам}$ в процесі віддування з фільтрату, обробленого оксидом кальцію ($5,0 \text{ мг/дм}^3$, рН 12,7) при різних температурах: 17°C (1); 25°C (2); 45°C (3).

відповідно меншу величину рН суміші, рівну 8,7; видно, що із зменшенням початкової величини рН суміші ефективність процесу віддування зменшувалась. Але навіть при початковому значенні рН суміші дорівнює 7,5 і температурі віддування 29 °С концентрація аміаку в суміші зменшувалася більш ніж у 4 рази.

На рис. 4 показано залежність залишкової концентрації амонійного азоту від температури віддування в пробах фільтрату, обробленого різними дозами оксиду кальцію, після 40 хв. здійснення процесу віддування зі швидкістю об'ємного потоку повітря 7,5 дм³/хв. Обсяг проби у своїй становив 150 см³. Найменша залишкова концентрація амонійного азоту в даному експерименті спостерігалася при найбільшій дозі оксиду кальцію, але в цьому випадку також відбувалися найменші зміни залишкової концентрації від температури. Навпаки, при менших дозах оксиду кальцію залишкова концентрація амонійного азоту вища і більше залежить від температури.

Таким чином, можна зробити висновок, що для очищення фільтратів звалищ ТПВ запропонований технологічний прийом є ефективним та економічно виправданим. Підвищення рН фільтрату при вапненні створює сприятливі умови для віддування аміаку на стадії передмембранного очищення. Показано, що віддуванням аміаку в зазначених умовах можна знизити концентрацію амонійного азоту в 10 і більше разів, що дозволяє довести його вміст у фільтраті до норм на скидання в каналізацію після подальшого баромембранного очищення (нанофільтрацією та зворотним осмосом), а також отримати цінне добриво шляхом уловлювання кислотою у вигляді нітрату чи сульфату амонію. Для більш детального відпрацювання технологічної схеми

віддування аміаку з фільтрату звалища, режимів її роботи та загальних енерговитрат необхідне проведення тривалих випробувань дослідної установки на реальному об'єкті.

Для встановлення кількісних закономірностей процесів віддування проведені такі математичні дослідження.

Відповідно до закону Генрі співвідношення між парціальним тиском газу над поверхнею рідини та його концентрацією у цій рідині у спрощеній формі можна виразити співвідношенням:

$$p = kc, \quad (1)$$

де c_p – концентрація компонента в розчині; p – парціальний тиск цього компонента у газовій фазі; k – коефіцієнт пропорційності, що відповідає коефіцієнту розподілу досліджуваного компонента між рідкою та газовою фазами.

Коефіцієнт k здебільшого приймають величиною постійної за постійних умов (тиск, температура, відсутність впливу крайових ефектів тощо). У проведених експериментах з віддування аміаку барботування повітря здійснювалося через розчин об'ємом V_0 з початковою концентрацією в ньому амонійного азоту (умовно аміаку) C_0 . За умов постійного робочого тиску та температури величину парціального тиску аміаку можна замінити на його концентрацію у газовій фазі:

$$C_g = \frac{m_g}{V_g}, \quad (2)$$

де m_g – масова кількість аміаку обсягом газової фази.

У процесі віддування концентрація C_g змінюється, тому в будь-який момент часу її можна уявити тільки в диференціальній формі. При цьому, відповідно (1), концентрація C_g буде пропорційною концентрації аміаку у фазі рідини C_p .

$$C_g = \frac{dm_g}{dV_g} = kC_p. \quad (3)$$

Таке наближення, очевидно, можна припустити, враховуючи незмінність умов проходження процесу. Початкова величина концентрації C_p була m_0 / V_0 , де m_0 – початкова маса аміаку в об'ємі V_0 розчину, в якому відбувається віддування.

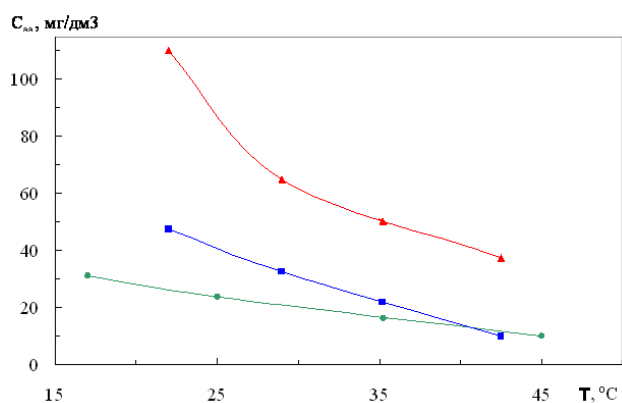


Рис. 4. Залежність зміни концентрації амонійного азоту C_{aa} в процесі віддування від температури T проведення процесу для різних доз CaO , мг/дм³: 5,0 (1), 3,0 (2); 1,0 (3).

У процесі віддування маса аміаку в розчині зменшуватиметься при незмінному його обсязі. Концентрація розчину в будь-який момент часу складатиме:

$$C_p = \frac{m_o - m_z}{V_o}, \quad (4)$$

де m_r – маса аміаку, що перейшла у газову фазу.

Враховуючи (3) та (4), отримуємо диференціальне рівняння процесу віддування:

$$\frac{dm_z}{dV_z} = k \frac{m_o - m_z}{V_o}. \quad (5)$$

Інтегрування рівняння (5) за граничних умов $V_r = 0$, $m_r = 0$ призводить до виразу (6):

$$V_o = \int_0^{m_z} \frac{dm_z}{m_o - m_z} = k \int_0^V dV_z$$

$$V_o \ln \frac{m_o}{m_o - m_z} = kV, \quad (6)$$

З урахуванням (4)

$$C_p = \frac{m_o - m_z}{V_o} = \frac{m_o}{V_o} e^{-k \frac{V}{V_o}}, \quad (7)$$

або

$$\ln C_p = \ln \frac{m_o}{V_o} - k \frac{V}{V_o}. \quad (8)$$

Враховуючи, що V пропорційно залежить від часу віддування ($V = f \tau$), то:

$$\ln C_p = \ln \frac{m_o}{V_o} - \frac{k}{V_o} f \tau. \quad (9)$$

Отже, величина $\ln C_p$ повинна лінійно залежати від часу пропускання повітря через розчин за умов постійної швидкості його подачі та інших умовах квазістаціонарності процесу.

По куту нахилу прямих поданої залежності можна визначити величину k , яка, аналогічно константі хімічної реакції, повинна залежати від температури відповідно до виразу:

$$k = F \cdot e^{\frac{E}{RT}}. \quad (10)$$

або

$$\ln k = \ln F + \frac{E}{RT} [5], \quad (11)$$

де F – стала величина у цій серії вимірів.

Лінійна залежність дає можливість визначити величину E , яка, по суті, відповідає енергії активації процесу віддування.

На рис. 5 надано лінійну залежність величини $\ln C_p$ від часу віддування τ аміаку з проб стічної води при різних дозах оксиду кальцію і температурі досліджуваної рідини (конкретні чисельні значення вказані в підписах під малюнками).

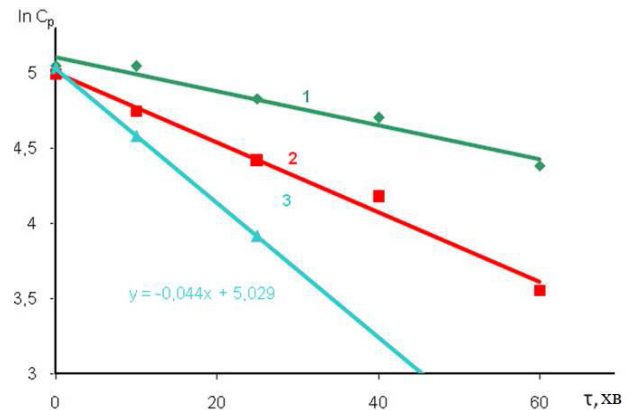


Рис. 5. Зміна величини $\ln C_p$ від часу віддування фільтрату, обробленого оксидом кальцію ($1,0 \text{ мг/дм}^3$, $\text{pH } 8,7$) при різних температурах: 22°C (1); 29°C (2); $42,5^\circ\text{C}$ (3)

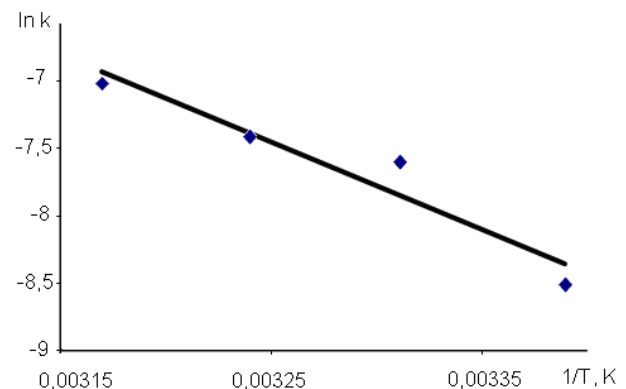


Рис. 6. Зміна у часі густини потоку маси пари при сушінні гранули що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$

За тангенсом кута нахилу одержаних прямих () (рис. 5) обчислено значення констант розподілу k (ур-е (1)). На основі отриманих даних побудовані графіки прямолінійної залежності в координатах $\ln k$ (ур-е 11), з тангенсу кута нахилу яких (рис.6) визначено величини енергії E , які в даному випадку дають кількісну оцінку енерговитрат на процес віддування. Проведені дослідження дали такі кількісні результати (табл. 1).

Порядок величин енергії активації віддування аміаку (E_a) загалом відповідає порядку величин водневого зв'язку у воді та подібних рідинах. Зі збільшенням дози CaO та, відповідно, величини pH розчину величина енергії активації віддування знижується, що можна пояснити збільшенням рухливості молекул аміаку при переході їх у неіонізований газоподібний стан.

У лабораторну установку (рис. 1) для проведення експериментів з уловлювання віддутого аміаку були підключені поглиначі аміаку 11-13, які являють собою скляні лабораторні дрекселі з відповідними барботерами. Барботерами служили фільтри Шота максимальної пористості, а для завантаження використовували бій скла розміром шматочків 3-6 мм.

З метою врахування впливу температури на процес віддування та поглинання аміаку, поглиначі, як і реактор-дегазатор, були поміщені в термостат.

Для поглинання використовували розчин сірчаної кислоти концентрацією 5 моль/дм³. Таку концентрацію

Табл. 1. Величини енергії активації віддування аміаку із проб СВ, оброблених різними дозами CaO .

Доза CaO , мг/л	pH	E_a , кДж/моль
1	8,7	54,1
3	10,5	40,5
5	12,7	24,5

Табл. 2. Результати експериментів із поглинання аміаку

№	Умови			Операція														
	Подача повітря, дм3/хв.	Т, °C	К-ть поглиначів	Віддувка						Поглинання						m _{погл}	M _{відд}	k = $\frac{m_{\text{погл}}}{m_{\text{відд}}}$
				До віддування			Після віддування			I погл.		II погл.		III погл.				
				C, мг/дм³	m, мг	pH	C, мг/дм³	m, мг	pH	C, мг/дм³	m, мг	C, мг/дм³	m, мг	C, мг/дм³	m, мг			
1	7,5	20	2	123,75	18,56	10,76	19	2,85	9,6	-	-	35	3,5	3,4	0,14	3,64	16,66	0,23
2	3,0	20	2	111,25	16,69	11,92	58,75	8,81	9,86	-	-	10-15	1,0-1,5	2,5	0,1	1,6	10,82	0,20
3	3,0	45	2	127,5	19,13	11,08	25,00	3,75	9,76	-	-	85	8,5	10	0,4	8,9	16,62	0,58
4	3,0	20	3	113,0	16,95	11,04	85,00	10,67	10,2	25,6	2,56	12,05	1,25	9,8	0,98	4,18	12,7	0,66
5	7,5	45	3	111,25	16,69	12,64	11,75	1,76	10,1	137,5	13,75	10	1,0	5,0	0,5	13,9	14,93	0,93

вибрали, виходячи з довідкових даних [6] про розчинність сульфату амонію, тобто концентрація сірчаної кислоти була достатньою (з невеликим запасом) для отримання насиченого розчину сульфату амонію.

Дослідження процесів віддування та уловлювання аміаку проводили на зразках вихідної СВ. 200 см³ СВ поміщали в конічну колбу, додавали 0,6 г оксиду кальцію (марки ХЧ) і перемішували магнітною мішалкою протягом 1,5 год. Після відстоювання отриманої суміші протягом 5 хв., 150 см³ розчину поміщали в реактор для проведення досліджень віддувці та уловлюванню аміаку.

Після завершення процесу віддування та уловлювання в отриманих пробах визначали вміст амонію за методикою [4]. При цьому кислі розчини попередньо нейтралізували 2-молярним розчином гідроксиду натрію до встановлення величини pH розчину в межах 6-8 за універсальним індикаторним папірцем. У пробах СВ, в яких здійснювали віддування, також вимірювали вміст амонію та величину pH як до, так і після віддування.

Результати отриманих вимірів наведено у табл. 2. Вони показують, що зменшення потоку повітря призводить як до зниження кількості віддутого амонію, так і до зниження частки поглиненого амонію по відношенню до кількості віддутого:

$$l = \frac{m_{\text{погл.}}}{m_{\text{відд.}}}$$

Величина l значно збільшується із підвищенням температури процесу. За температури 45°C отримано $l = 0,54$. Значно підвищується кількість поглиненого аміаку також зі збільшенням кількості поглинальних колонок (в експерименті з трьома колонками l становило 0,33 при кімнатній температурі віддування і швидкості подачі повітря 3 дм³/хв).

Як очевидно з табл. 2 незначне зниження величини рН в оброблюваних розчинах симбатно кількості віддутого з них аміаку. Зниження величини рН у процесі віддування в даному випадку є явищем позитивним, оскільки однією з цілей наступної операції (карбонізація) в технологічному процесі, що розробляється, є зниження величини рН оброблюваної води.

Отримані результати експериментів щодо оцінки можливості застосування розглянутих способів уловлювання аміаку показали перспективність обраного підходу.

Дані таблиці. 2 показують, що збільшення потоку повітря, продуваного через досліджуваний розчин, тобто обсягу повітря, що пройшов через розчин за одиницю часу (1 год) призводить до збільшення кількості аміаку віддутого (коефіцієнт Γ змінюється мало).

Значне підвищення коефіцієнта поглинання спостерігається підвищення температури процесу. Збільшення кількості поглиначів із 2-х до 3-х також підвищує коефіцієнт поглинання. За даними табл. 2 при температурі процесу віддування 45 °С та швидкості об'ємного потоку повітря 7,5 дм³/хв з досліджуваної проби (за 1 ч.) віддується близько 90 % амонійного азоту, який майже повністю поглинається трьома поглиначами

Висновки

Результати досліджень, проведених у даній роботі на лабораторному устаткуванні, показують високу ефективність застосування вивчених методів у технології очищення води від сполук амонію з подальшим уловлюванням для отримання амонійних добрив. Представлені у роботі теоретичні закономірності досліджених процесів дають можливість, з урахуванням мінімальної кількості експериментальних вимірів, графічно визначати величини, необхідних подальших технологічних розрахунків, зокрема, визначення енерговитрат виконання відповідних технологічних операцій

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гвоздяк П.І. Біохімія води. Біотехнологія води. Сировина, властивості, режими, обладнання, технології. Київ Видавничий дім "Києво-Могилянська академія", 2019. 218 с.
2. Гончарук В.В., Шкавро З.Н., Бадеха В.П., Кучерук Д.Д., Сова А.Н., Бадеха А.В. Комплексная очистка сточных вод свалок твердых бытовых отходов. Химия и технология воды, 2007, Т.29, №1. С. 55 – 65.
3. Гончарук В.В., Шкавро З.Н., Бадеха В.П., Кучерук Д.Д., Сова А.Н., Кочкодан В.М. Очистка дренажной воды свалок твердых бытовых отходов с использованием оксида кальция для предметбранной обработки. Химия и технология воды, 2005, №13. С. 605 – 612.
4. Новиков Ю.В. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990. 400 с.
5. Герасимова Я.И. Курс физической химии, т. II. М., «Химия», 1973. 624с
6. Горюновский И.Т. Краткий справочник по химии. К.: Наук. думка, 1974. 992 с

REMOVAL OF AMMONIA FROM SOLID WASTE LANDFILL WASTEWATER BY BLOWING

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Badekha A.V.²**, *postgraduate*

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, badekha@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3903-3766>*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.8>

An urgent task at the current level of society's development is to clean the environment from pollution caused by human activity. It is necessary to maintain and increase the capacity of water and land recycling and reuse systems, and to develop waste-free and resource-saving technologies.

The problem of treating wastewater (leachate) from solid waste landfills is one of the most pressing issues of national importance. Such leachates from solid waste landfills pose a serious threat to the environment due to large-scale and uncontrolled pollution of groundwater and surface water.

Today, in Ukraine, landfill leachate is usually not treated and flows into surface and groundwater without any treatment, causing enormous environmental damage.

Therefore, the aim of this work is to study the process of ammonia blowing in order to obtain quantitative regularities necessary for further design of the relevant equipment and determine the required technological modes.

The results of the work showed that increasing the pH of the filtrate during liming creates favourable conditions for ammonia blowing off at the pre-membrane treatment stage. It has also been shown that ammonia blowing under these conditions can reduce the concentration of ammonium nitrogen by 10 times or more, which makes it possible to bring its content in the filtrate to the standards for discharge into the sewer after further baromembrane treatment, as well as to obtain a valuable fertiliser by capturing it with acid in the form of ammonium nitrate or sulphate. Thus, it can be concluded that the proposed technological method is effective and economically justified for the treatment of landfill leachate.

The results of the studies carried out in this work on laboratory equipment show the high efficiency of the application of the studied methods in the technology of water purification from ammonium compounds with subsequent recovery for the production of ammonium fertilisers. The theoretical regularities of the studied processes presented in this work make it possible, taking into account the minimum number of experimental measurements, to graphically determine the values required for further technological calculations, in particular, to determine the energy consumption of the relevant technological operations.

References 6, figure 6, table 1.

Key words: wastewater, solid waste, ammonia, fertilisers.

1. *Hvozdiak P.I.* Biokhimiia vody. Biotekhnolohiia vody. Syrovyna, vlastyvoli, rezhymy, obladnannia, tekhnolohii [Biochemistry of water. Biotechnology of water. Raw materials, properties, modes, equipment, technologies], Kyiv-Mohyla Academy Publishing House, 2019, 228. (in Ukr.).

2. *Goncharuk V.V., Shkavro Z.N., Badeha V.P., Kucheruk D.D., Sova A.N., Badeha A.V.* Kompleksnaya ochildka stochnyih vod svalok tverdyih byitovyih othodov [Integrated wastewater treatment of solid domestic waste dumps]. Chemistry and Technology of Water, 2007, 29, 55–65. (in Rus.)

3. *Goncharuk V.V., Shkavro Z.N., Badeha V.P., Kucheruk D.D., Sova A.N., Badeha A.V.* Ochildka drenazhnoy vodyi svalok tverdyih byitovyih othodov s ispolzovaniem oksida kaltsiya dlya predmembrannoy obrabotki [Treatment of municipal solid waste landfill drainage water using calcium oxide for pre-membrane treatment]. Chemistry and Technology of Water, 2005, 13, 605 – 612. (in Rus.)

4. *Novikov Yu.V.* Metodyi issledovaniya kachestva vodyi vodoemov [Methods of research of water quality of water reservoirs]. Moscow: Medicine, 1990. 400. (in Rus.)

5. *Gerasimova Ya.I.* Kurs fizicheskoy himii, t. II. [Course of Physical Chemistry, vol. II.]. Moscow, 'Khimiya', 1973. 624. (in Rus.)

6. *Goronovskiy I.T.* Kratkiy spravochnik po himii. [Brief reference book on chemistry] Kiev: Nauk. dumka, 1974. 992 (in Rus.).

Отримано 17.10.2024

Received 17.10.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 620.92

РОЛЬ РІДКИХ БІОПАЛИВ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРУ

Желєзна Т.А.¹, канд. техн. наук, Драгнєв С.В.², канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186><https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>

Представлено поточний стан та перспективи виробництва рідких моторних біопалив у світі. Розглянуто цілі ЄС по декарбонізації транспорту, а також можливі заходи для досягнення цього у різних видах транспорту. Проаналізовано кліматичну політику України в розрізі використання відновлюваної енергії. Розроблено рекомендації для розвитку виробництва і споживання рідких моторних біопалив в країні.

The current state and prospects for the production of motor biofuels in the world are presented. EU's objectives for the decarbonization of transport as well as possible measures to achieve the goals for different types of transport are considered. Ukraine's climate policy regarding the use of renewable energy is analyzed. Recommendations for the development of motor biofuels production and consumption in Ukraine are developed.

Бібл. 16, табл. 3.

Ключові слова: рідкі біопалива, передові біопалива, моторні біопалива, біоетанол, біодизель, декарбонізація.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВХО – використана харчова олія;

НВВ – національно визначений внесок;

НПЕК – Національний план з енергетики та клімату;

ПГ – парникові гази;

САП – сталє авіаційне паливо;

СПК – синтетичний парафіновий керосин;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

Ф-Т – Фішер-Тропш;

н.е. – нафтовий еквівалент;

FAME – метилові естери жирних кислот;

HEFA – гідроочищення естерів та жирних кислот;

HVO – гідроочищена рослинна олія;

IATA – Міжнародна асоціація повітряного транспорту;

ІМО – Міжнародна морська організація.

Актуальність роботи обумовлена загальною необхідністю скорочення викидів парникових газів, у тому числі діоксиду вуглецю у транспортному секторі. Одним із заходів для досягнення цього є використання рідких моторних біопалив. Особливо ефективним з точки зору декарбонізації є споживання рідких біопалив другого покоління. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для розвитку виробництва та споживання біоетанолу і дизельного біопалива в Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Виробництво рідких біопалив у світі

Виробництво рідких моторних біопалив у світі стало зростає протягом останніх десятиріч. Сьогодні обсяг глобального виробництва біодизелю і біоетанолу становить близько 190 млрд л/рік, що у десять разів більше показника 2000 року [1, 2]. Лідерами виробництва біоетанолу є США (46% від загального, основна сировина – кукурудза) і Бразилія (25%, цукрова тростина

і кукурудза). Крупними виробниками біодизелю є ЄС (32%, основні види сировини – ріпакова олія, пальмова олія, ВХО), США (більше 18%, ВХО, соєва олія), Індонезія (18%, пальмова олія) і Бразилія (12%, соєва олія). Протягом наступних десяти років прогнозується збільшення виробництва біоетанолу з поточних 130 до 151 млрд л/рік, біодизелю – з 59 до 67 млрд л/рік. Основний приріст очікується в США, Бразилії, Індонезії, тоді як в ЄС обсяг отримання рідких біопалив залишатиметься приблизно на існуючому рівні [3].

Наразі виробляються, головним чином, біопалива I покоління. Так, на традиційний біоетанол припадає більше 80% загальносвітового виробництва; майже весь біодизель, що отримується в ЄС (близько 20 млрд л/рік), також є біопаливом I покоління [3, 4]. В Європі діє асоціація виробників біоетанолу ePURE, яка включає компанії з ЄС-27 та Об'єднаного Королівства. Члени асоціації виробляють 85% (5,7 млрд л у 2022 р.) загального обсягу отримання біоетанолу в ЄС. Майже поло-

вина рідкого біопалива виробляється членами ePURE з кукурудзи, 22% – з пшениці, 14% – з цукровмісної сировини.

Передові біопалива (II покоління) виробляються з лігноцелюлозної/целюлозної біомаси та інших видів сировини, що не створюють конкуренції продуктам харчування і кормам (гній тварин, осад стічних вод, біомасова фракція твердих побутових відходів та ін.). Повний перелік видів сировини для отримання передових рідких біопалив наведено у Додатку IX Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (RED III) [5]. За даними 2022 р., в США працюють 9 комерційних установок з виробництва біоетанолу II покоління, в ЄС – 5 (табл. 1) [6]. Близько 7 заводів з отримання передового біопалива HVO працюють в ЄС (Іспанія, Швеція, Фінляндія), ще два заплановані до будівництва (Нідерланди, Фінляндія). HVO – гідроочищена рослинна олія, яка на відміну від біодизелю (FAME) являє собою вуглеводні, що не містять кисню.

Основною причиною повільного розвитку виробництва передових рідких біопалив є великі капітальні, а іноді і операційні витрати відповідних установок. Це

призводить до високої собівартості кінцевого продукту і його обмеженої конкурентоспроможності. За експертними оцінками, навіть у 2030 р. собівартість передових біопалив може бути у 1,6...2,7 разів вище, ніж у біопалив I покоління (табл. 2) [7]. З огляду на це, активно ведуться дослідження можливих шляхів скорочення інвестиційних та інших витрат на будівництво і експлуатацію заводів з виробництва рідких біопалив II покоління [8].

Окрім моторних біопалив для дорожнього і водного транспорту, у світі виробляються також рідкі біопалива для сектору авіації – сталі авіаційні палива. На сьогодні обсяг їх виробництва є відносно невеликим, але має місце непогана динаміка росту. У 2023 р. було отримано близько 600 млн л САП, що вдвічі вище, ніж у 2022 р., а прогноз на 2024 р. – 1,9 млрд л [9]. САП являє собою синтетичний парафінові керосин, отриманий різними технологіями конверсії з відповідних видів біомасової сировини. Наразі найбільш розвиненим є виробництво сталого авіаційного палива за технологією HEFA (біопаливо I покоління), оскільки воно може отримуватися як окрема фракція при виробництві гідроочищеної

Табл. 1. Параметри водовугільного палива [3]

Країна	Вид сировини*	Потужність
США (назва компанії/проєкту):		млн галонів/рік
Проект Liberty	целюлозна біомаса	25
Quad County Corn Processors	кукурудза/целюлозна біомаса	38
Ace Ethanol LLC	кукурудза/целюлозна біомаса	54
Poet Biorefining-Iowa Falls LLC	кукурудза/целюлозна біомаса	115
Louis Dreyfus Grand Junction LLC	кукурудза/целюлозна біомаса	125
Poet Biorefining-Shell Rock LLC	кукурудза/целюлозна біомаса	140
PureField Ingredients LLC	кукурудза/сорго/целюлозна біомаса	55
Pelican Acquisition LLC	кукурудза/сорго/целюлозна біомаса	60
Element LLC	кукурудза/сорго/целюлозна біомаса	70
NewEnergyBlue LLC (будується)	целюлозна біомаса	20
Verbio North America Corp. (будується)	кукурудза/целюлозна біомаса	60
Lanzatech Freedom Pines Fuels LLC (будується)	целюлозна біомаса/біогаз	10
ЄС (країна, рік запуску):		млн л/рік
Фінляндія, 2018 р.	тирса	10
Італія, 2020 р.	лігноцелюлозна біомаса	28
Австрія, 2020 р.	деревна біомаса	30
Румунія, 2021 р.	солома пшениці	65
Болгарія, 2021 р.	стебла кукурудзи	50
Польща, 2025 р. (заплановано)	лігноцелюлозна біомаса	30

* На ряді установок в США одночасно виробляється передовий і біоетанол I покоління.

рослинної олії. Мають гарні перспективи розвитку САП II покоління – СПК, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша і СПК, вироблений за технологією конверсії спиртів. В обох випадках сировиною може бути лігноцелюозна біомаса [10]. Треба зазначити, що окрім біопалив, до САП також відносять синтетичне паливо, яке отримується шляхом електролізу води із наступним застосуванням синтезу Фішера-Тропша.

Цілі ЄС по декарбонізації транспортного сектору

З кінця 2019 р. в ЄС реалізується Європейський зелений курс, мета якого – досягнення нульової нетто-емісії парникових газів до 2050 р. Однією з важливих передумов для цього є виконання цілі, поставленої для транспорту – скорочення викидів ПГ на 90% до 2050 р. відносно базового рівня 1990 р. Європейською Комісією розроблено Стратегію розвитку сталого і ефективного транспортного сектору, в якій зазначено основні напрямки розвитку, а також ключові показники реалізації цієї стратегії до 2030, 2035 і 2050 років. Одним із важливих заходів для декарбонізації визначено суттєве збільшення споживання відновлюваних і низьковуглецевих палив дорожнім транспортом, авіацією і водним транспортом із забезпеченням розвитку відповідної інфраструктури [11].

Поточна короткострокова мета ЄС в рамках виконання Європейського зеленого курсу – зменшити викиди парникових газів не менш як на 55% до 2030 року. Для її досягнення розроблено пакет пропозицій із зміни та оновлення відповідних розділів законодавства ЄС зі скороченою назвою «Відповідність цілі 55» (в оригіналі «Fit for 55»). Частина законодавчих пропозицій стосується транспортного сектору, частка якого у загальному обсягу емісії ПГ в ЄС складає близько 25%, у тому числі дорожній транспорт – 18%, авіація – 4%, морський транспорт – 3%. Законодавчий пакет «Fit for 55» передбачає розвиток інфраструктури, зокрема збільшення зарядних/заправних станцій для транспор-

тних засобів на альтернативних паливах. Згідно Регламенту ЄС 2023/1804, альтернативні палива включають електроенергію, водень, аміак, рідкі біопалива, біогаз, стиснений/скраплений природний газ та деякі інші види палив [12].

Важливою складовою «Fit for 55» є законодавча ініціатива із декарбонізації авіації RefuelEU, що зобов'язує постачальників авіаційного палива включати частку САП щонайменше 2% у 2025 р., 6% – у 2030 р. і 70% – у 2050 р. Регламент FuelEU для морського транспорту (також частина «Fit for 55») містить заходи, спрямовані на зменшення інтенсивності викидів парникових газів від сектору судноплавства на величину від 2% у 2025 р. до 80% до 2050 р. порівняно з середнім рівнем 2020 р. Це буде досягнуто, зокрема, і за рахунок використання відновлюваних видів палива.

Директивою ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (RED III) поставлено за мету кожній країні-члену досягти не менш як 29% відновлюваної енергії у кінцевому енергоспоживанні на транспорті до 2030 р. або зменшити інтенсивність викидів парникових газів принаймні на 14,5% до 2030 р. порівняно з базовим значенням. Методику розрахунку інтенсивності ПГ і визначення базових значень наведено в Директиві.

Перевагою застосування передових біопалив є значне скорочення викидів парникових газів, що гарантує виконання вимог RED III: зменшення емісії ПГ принаймні на 65% від споживання на транспорті біопалив, вироблених на установках, що почали роботу з 01.01.2021. Наприклад, згідно Директиви, зменшення викидів ПГ за замовчуванням складає 83% для біоетанолу, отриманого з соломи пшениці, 84% для біометанолу з деревних відходів, 89% для дизельного біопалива, отриманого конверсією Фішера-Тропша з чорного лугу (частина В Додатку IV RED III). Передові біопалива зараховуються з коефіцієнтом 2 (по енергетичному вмісту) при визначенні частки відновлюваної енергії на транспорті; для авіації і морського транспорту – коефіцієнт 1,2 [6].

Табл. 2. Прогноз собівартості рідких біопалив I і II покоління в Європі у 2030 році [7]

Вид рідкого біопалива	Собівартість, євро/т н.е.
Біоетанол I покоління з крохмалевмісної сировини	565
Біоетанол I покоління з цукровмісної сировини	915
Передовий біоетанол з целюлозної сировини	1545
Біодизель I покоління з рослинної олії (FAME)	690
Гідроочищена рослинна олія (HVO, біопаливо I покоління)	1100
HVO з використаної харчової олії (біопаливо I покоління)	1150
Передовий біодизель	1860

Напрямки скорочення викидів діоксиду вуглецю у авіації і морському транспорті

На сектор транспорту припадає близько чверті глобальних викидів діоксиду вуглецю, у тому числі на авіацію – 2,5...3%. За оцінками Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA), якщо не вживати відповідних заходів, то емісія CO₂ від авіації може зрости до 2 млрд т/рік у 2050 р., що вдвічі більше показника 2010 р. Міжнародна коаліція експертів повітряного транспорту (ATAG) прогнозує, що цей ріст може бути навіть більше – до 3,1 млрд т CO₂/рік у 2050 р. Основ-

ними напрямками декарбонізації авіації вважаються використання сталих авіаційних палив і розвиток/вдосконалення технологій, що стосуються цього сектору [13].

Згідно оцінок Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO), річне виробництво різних видів САП у регіонах світу до 2035 р. може досягти майже 60 млн т [14]. При цьому найбільші обсяги виробництва САП припадуть на США (29% від загального), Бразилію (19%) і ЄС (17%) (табл. 3). Очікується отримання САП, головним чином, за технологіями гідроочищення естерів та жирних кислот, синтезу Фішера-Тропша, конверсії

Табл. 3. Прогноз обсягів виробництва САП до 2035 р. за регіонами світу та технологіями [14]

Країна / регіон	Технологія виробництва (сировина)	Обсяг виробництва САП	
		млн т/рік	частка від загального
США	HEFA (соєва олія)	1,3	2,2%
	Конверсія спиртів/етанолу у реактивне паливо (кукурудза)	2,4	4,0%
	Синтез Ф-Т; конверсія спиртів/етанолу у реактивне паливо (міскантус)	1,6	2,7%
	Синтез Ф-Т; конверсія спиртів/етанолу у реактивне паливо (просо прутіподібне)	1,6	2,7%
	Синтез Ф-Т (тополя)	1,6	2,7%
	Інші САП, у тому числі HEFA (олія рослини Carinata*)	8,6 (0,1)	14,4% (0,25%)
	Загалом	17,0	28,7%
Бразилія	HEFA (соєва олія)	1,0	1,7%
	Синтез ізопарафінів (цукрова тростина)	2,4	4,0%
	Конверсія спиртів/етанолу у реактивне паливо (цукрова тростина)	2,4	4,0%
	Інші САП, у тому числі HEFA (олія рослини Carinata)	5,6 (0,1)	9,3% (0,25%)
	Загалом	11,4	19%
ЄС	HEFA (ріпакова олія)	1,5	2,5%
	Синтез Ф-Т; конверсія спиртів/етанолу у реактивне паливо (міскантус)	1,2	2,0%
	Синтез ізопарафінів (цукровий буряк)	1,8	3,0%
	Інші САП	5,5	9,2%
	Загалом	10,0	16,7%
Малайзія та Індонезія	HEFA (пальмова олія)	1,2	2,0%
	Інші САП	0,3	0,5%
Інші регіони світу	Різні технології та види сировини	19,8	33,2%
Всього		59,7	100%

* Олійна рослина Carinata вирощується як проміжна (покривна) культура, щоби уникнути конкуренції з основними культурами сівозміни.

спиртів, гідроочищення ферментованих цукрів (синтез ізопарафінів). Ріст виробництва і споживання САП (біопалив) має зробити найбільш вагомий внесок у виконання зобов'язання, прийнятого Міжнародною асоціацією повітряного транспорту (IATA). Світові авіалінії-члени IATA у 2021 р. прийняли зобов'язання досягти нульової нетто-емісії вуглецю від своєї діяльності до 2050 р. Це відповідає цілям Паризької Угоди 2015 р. по утриманню глобального потепління в рамках 1,5 °С. Інші напрямки декарбонізації авіації включають використання водню, електричних батарей, а також загальне підвищення енергоефективності сектору і застосування технологій уловлення вуглецю.

Міжнародне судноплавство відповідальне за близько 3% глобальних антропогенних викидів парникових газів. Крім того, щорічно цим сектором викидається 15% загального обсягу емісії оксидів сірки (SO_x) та 13% оксидів азоту (NO_x). За експертними оцінками, без запровадження дієвих заходів викиди CO_2 від судноплавства продовжать зростати і до 2050 р. можуть сягнути 90...130% рівня викидів 2008 р. Це становитиме 1...1,35 млрд т/рік. Стратегія розвитку сектору, розроблена Міжнародною морською організацією (ІМО), передбачає скорочення загальних викидів парникових газів на рівні не менше 50% до 2050 р. у порівнянні з 2008 р. ІМО розробляє заходи для скорочення викидів ПГ від міжнародного судноплавства. Так, з 01.01.2019 запрацювала система збору даних ІМО щодо споживання палив для суден валовою місткістю від 5000 т; з 01.01.2023 запроваджено індекс енергоефективності існуючого судна та індикатор інтенсивності вуглецю. За прогнозами ІМО, близько 64% загального обсягу скорочення CO_2 від судноплавства у 2050 р. буде досягнуто за рахунок використання альтернативних палив з низьким/нульовим вмістом вуглецю, у тому числі скрапленого природного газу, зрідженого нафтового газу, рідких біопалив, метанолу, аміаку, водню [15]. Інші напрямки скорочення викидів ПГ включають оптимізацію логістики судноплавства, покращення гідродинамічних та технічних характеристик суден, впровадження технологій накопичення та зберігання вуглецю.

Кліматична політика України і місце відновлюваної енергетики в ній

Кліматична політика України спрямована на систематичне скорочення викидів парникових газів, перехід до низьковуглецевого розвитку, збільшення у структурі загального кінцевого енергоспоживання частки енергії, виробленої з відновлюваних та низьковуглецевих джерел. Так, згідно Стратегії формування та

реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року (Розпорядження КМУ № 483-р від 30.05.2024), оновлений НВВ України до Паризької угоди має не перевищувати 35% викидів ПГ рівня базового 1990 р., із забезпеченням подальшого перегляду рівня амбітності такого показника з урахуванням показників соціально-економічного розвитку держави. Прикладами інших важливих цілей Стратегії є досягнення скорочення на 85% викидів ПГ при виробництві теплової та електричної енергії порівняно з базовим 1990 р., збільшення до 20% частки виробництва електроенергії з ВДЕ в загальному енергобалансі, впровадження національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів.

Розвиток використання ВДЕ, у тому числі ріст обсягів споживання рідких біопалив на транспорті, є одним з засобів досягнення стратегічних кліматичних та енергетичних цілей України. Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року (Розпорядження КМУ № 430-р 30.05.2018) заплановано збільшення рівня застосування альтернативних видів палива та електроенергії до 50% до 2030 р.

Важливі та амбітні цілі міститься також у Національному плані з енергетики та клімату на період до 2030 року (схвалено Кабінетом Міністрів України 25.06.2024), зокрема:

- скорочення викидів парникових газів на 65% порівняно з рівнем 1990 року;
- досягнення 27% частки ВДЕ у загальному кінцевому енергоспоживанні, у тому числі 25% в електриці, 35% в теплі, 14% на транспорті;
- поглиблення диверсифікації джерел і шляхів постачання енергоресурсів – не більше 30% від одного постачальника;
- первинне споживання енергії – не більше 72224 тис. т н.е./рік, кінцеве споживання енергії – 42168 тис. т н.е./рік.

Значним кроком на шляху розширення використання ВДЕ на транспорті є прийняття у 2024 році Закону України про обов'язковий вміст рідкого біопалива (біокомпонентів) у бензинах, що продаються на території України [16]. Згідно Закону, з 1 травня 2025 року обов'язкова частка рідкого біопалива (біокомпонентів) в автомобільних бензинах повинна становити не менш як 5% об'ємних, крім бензинів з октановим числом 98 і вище та бензинів, що поставляються для потреб Міністерства оборони України, центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері державного матеріального резерву, та для створення мінімальних запасів нафти та нафтопродуктів.

Невиконання вимоги щодо обов'язкового вмісту рідкого біопалива (біокомпонентів) у бензинах тягне за собою накладання штрафу.

Важливо, що рідке біопаливо (біокомпоненти) та біогаз, призначені для використання у галузі транспорту, незалежно від місця вирощування сировини для їх виробництва, мають відповідати критеріям сталості, передбаченим цим Законом. Критерії сталості вимагають не використовувати для вирощування біомасової сировини земельні ділянки, що мають підвищене значення для біологічного різноманіття, містять високий вуглецевий запас, на 01.01.2008 належали до торфовищ та деякі інші. Крім того, технічні вимоги щодо скорочення обсягів викидів парникових газів від виробництва і використання рідкого біопалива (біокомпонентів) та біогазу, призначених для використання на транспорті, визначаються відповідно до національного стандарту.

Запровадження вимоги щодо обов'язкового вмісту рідкого біопалива (біокомпонентів) у бензинах, що продаються на території України, є важливим досягненням, оскільки невдалі спроби прийняття аналогічних законів робилися в країні вже протягом більше 20 років. При цьому, норму у 5% об'ємних вмісту рідкого біопалива (біокомпонентів) не можна вважати дуже високою, оскільки в ЄС з 2009 р. успішно розвивається ринок бензину E10 із вмістом біоетанолу до 10%. На сьогодні E10 активно споживається у 19 країнах ЄС і займає високу або навіть всю частку загального ринку бензинів. Наприклад, в Болгарії і Румунії ця частка складає 100%, у Нідерландах – 96%, в Данії – 92%, в Фінляндії, Угорщині, Бельгії, Словаччині – більше 75%.

За даними 2021 р., споживання бензинів в Україні становило 2 млн т/рік. Біоетанол використовувалася в обсязі близько 81 тис. т/рік (2020 р.), а його власне виробництво складало в межах 100 тис. т/рік. П'ять відсотків від 2 млн т бензину на рік – це 100 тис. т, з чого витікає, що теоретично українські біоетанольні заводи здатні самостійно забезпечити виконання законодавчої вимоги щодо обов'язкового вмісту біоетанолу у бензинах. Інший аспект питання полягає у тому, що в Україні виробляється лише біоетанол I покоління, тоді як значні скорочення викидів парникових газів досягаються при використанні передових біопалив. Як вже зазначалося, Директивою ЄС 2018/2001 вимагається скорочення викидів ПГ від споживання на транспорті рідких біопалив і біогазу принаймні на 65% для установок, що виробляють ці біопалива і були уведені в експлуатацію з 01.01.2021. Цю вимогу можуть виконати далеко не всі установки з виробництва рідких біопалив I покоління,

тоді як передові біопалива здатні забезпечити скорочення емісії ПГ у порівнянні з викопним паливом на 80% і більше.

Виконання законодавчої норми щодо 5% вмісту біоетанолу в бензинах дасть можливість зменшити викиди діоксиду вуглецю в Україні на більш ніж 120 тис т/рік. Ця оцінка відповідає умові скорочення викидів ПГ на 65% порівняно з використанням викопних палив. Згідно Директиви ЄС 2018/2001, такого показника може досягти, наприклад, біоетанольний завод, який виробляє біопаливо з кукурудзи або інших зернових і використовує порубкові залишки як паливо на ТЕЦ. Інші можливі варіанти – виробництво біоетанолу з цукрового буряка з використанням природного газу як палива на ТЕЦ, виробництво біоетанолу з цукрового буряка із паралельним отриманням біогазу з рідкої фракції відходів та споживанням природного газу в котлі та деякі інші.

Висновки та рекомендації для України

Україна має значний потенціал для виробництва рідких моторних біопалив I і II покоління, якого достатньо для задоволення власних потреб і для експорту. За оцінками авторів, економічний потенціал виробництва моторних біопалив становить:

- біоетанол I покоління (з кукурудзи, меляси) – 1,42 млн т/рік;
- передовий біоетанол (з побічних продуктів виробництва кукурудзи на зерно) – 1,18 млн т/рік;
- дизельне біопаливо I покоління (з ріпаку, використаної харчової олії, некондиційних олій, рослинних і тваринних жирів) – 750 тис. т/рік;
- передове дизельне біопаливо (з олійних енергетичних рослин, вирощених на незадіяних сільськогосподарських землях) – 330 тис. т/рік.

Нагальною задачею для країни є практичний розвиток виробництва рідких моторних біопалив. Це включає нарощування обсягів отримання біоетанолу і відновлення виробництва дизельного біопалива. Встановлена потужність існуючих біоетанольних заводів складає близько 400 тис. т/рік, отже, обсяги виробництва можна збільшити у 4...5 разів порівняно з довоєнним періодом. Для відновлення виробництва дизельного біопалива необхідно перевірити технічний стан заводів, побудованих у 2008-2010 рр. на виконання державної Програми розвитку виробництва дизельного біопалива. Оскільки виробництво цього виду біопалива в Україні взагалі відсутнє протягом останнього десятиріччя, рекомендується прийняття нової державної програми. Іншою рекомендацією є розробка стратегії виробництва передових біопалив в Україні, яка включатиме вико-

нання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт. На перших етапах впровадження цей напрямок може потребувати певних фінансових пільг або державних субсидій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Global Bioenergy statistics report*. WBA, 2023.
<https://www.worldbioenergy.org/uploads/231219%20GBS%20Report.pdf>
2. *Production of biofuels worldwide in 2022 with a forecast until 2030*. Statista, 2024.
<https://www.statista.com/statistics/1440696/biofuel-production-forecast-by-product-type/>
3. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*. OECD/FAO, 2022.
<https://www.oecd-ilibrary.org/deliver/f1b0b29c-en.pdf?itemId=%2Fcontent%2Fpublication%2Ff1b0b29c-en&mimeType=pdf>
4. *Advanced biofuels in the European Union*, JRC, 2022.
<https://www.etipbioenergy.eu/images/Advanced%20Biofuels%20-%20CETO%20Report%202022.pdf>
5. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Consolidated amended version*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20231120>
6. Broda M., Yelle D., Serwanska K. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass – Challenges and Solutions // *Molecules*. – 2022, v. 27, issue 24, 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
7. Szabo Z. Biofuel Policy-Making Based on Outdated Modelling? The Cost of Road Transport Decarbonisation in EU // *Fuels*. – 2023, v. 4, N 3, p. 354-362. <https://doi.org/10.3390/fuels4030022>
8. Желєзна Т.А., Драгнєв С.В. Аналіз напрямків підвищення конкурентоспроможності рідких біопалив другого покоління // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2023, т. 45, № 3, с. 78-87. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>
9. Hemant Mistry. Sustainable Aviation Fuel. IATA, 2023.
<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/presentations/saf-gmd2023/>
10. Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Перспективи використання біопалив другого покоління як авіаційного палива // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2022, т. 44, №2, с. 54-63 <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.7>
11. *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future*. COM (2020) 789 final, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0789>
12. *Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804>
13. Doliente S.S., Narayan A., Tapia J.F.D. et al. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components // *Front. Energy Res.* – 2020, v. 8, art. 110. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110>
14. *CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology*, version 4, November 2021. bit.ly/3XbmFxr
15. *Fourth IMO GHG Study 2020*. IMO, 2021. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf
16. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» № 3769-IX від 04.06.2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3769-IX#Text>

ROLE OF BIOFUELS IN TRANSPORT SECTOR DECARBONIZATION

Zheliezna T.A.¹, Drahnev S.V.²

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

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of
the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii
Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of
the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii
Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>

The purpose of the work is to develop recommendations for the development of production and consumption of bioethanol and diesel biofuel in Ukraine as a component of the general process of the transport sector decarbonization. The production of motor biofuels in the world has been growing during the last decades. Today, the volume of global production of biodiesel and bioethanol is about 190 billion liters per year, which is ten times more than in 2000. In addition to motor biofuels for road and waterborne transport, there is also in the world the production of biofuels for the aviation sector – sustainable aviation fuels. Today, the volume of their production is relatively small, but the growth dynamics is quite good. The opportunities for using alternative fuels with low or zero carbon content in marine transport are investigated. Since the end of 2019, the EU has been implementing the European Green Deal, the goal of which is to achieve zero net emissions of greenhouse gases by 2050. One of the important prerequisites for this is the fulfillment of the target set for transport, namely to reduce greenhouse gas emissions by 90% by 2050. The climate policy of Ukraine is aimed at systematic reducing greenhouse gas emissions, transitioning to low-carbon development, and increasing the share of energy produced from renewable and low-carbon sources in the structure of the total final energy consumption. The development of renewable energy sources, including biofuels consumption growth in transport, is one of the means of achieving the country's strategic climate and energy goals. Ukraine has a

considerable potential for the production of motor biofuels of the first and second generations, which is sufficient to meet its own needs and also be exported. An urgent task for the country is the practical development of the production of motor biofuels. This includes increasing the production of bioethanol and resuming the production of diesel biofuel. It is recommended that a strategy for the production of advanced biofuels in Ukraine should be elaborated, which will include intensive research and development activity. At the first stages of its implementation, this sector may require certain financial benefits or government subsidies.

References 16, tables 3.

Key words: liquid biofuels, advanced biofuels, motor biofuels, bioethanol, biodiesel, decarbonisation.

1. *Global Bioenergy statistics report*. WBA, 2023. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/231219%20GBS%20Report.pdf>
2. *Production of biofuels worldwide in 2022 with a forecast until 2030*. Statista, 2024. <https://www.statista.com/statistics/1440696/biofuel-production-forecast-by-product-type/>
3. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*. OECF/FAO, 2022. <https://www.oecd-ilibrary.org/deliver/f1b0b29c-en.pdf?itemId=%2Fcontent%2Fpublication%2Ff1b0b29c-en&mimeType=pdf>
4. *Advanced biofuels in the European Union*, JRC, 2022. <https://www.etipbioenergy.eu/images/Advanced%20Biofuels%20-%20CETO%20Report%202022.pdf>
5. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Consolidated amended version*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20231120>
6. Broda M., Yelle D., Serwanska K. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass – Challenges and Solutions // *Molecules*. – 2022, v. 27, issue 24, 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
7. Szabo Z. Biofuel Policy-Making Based on Outdated Modelling? The Cost of Road Transport Decarbonisation in EU // *Fuels*. – 2023, v. 4, N 3, p. 354-362. <https://doi.org/10.3390/fuels4030022>
8. Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Analiz napriamkiv pidvyshchennia konkurentospromozhnosti ridkykh biopalyv druhoho pokolinnia [Analysis of directions for increasing the competitiveness of second generation biofuels.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 45, № 3 (2023), P. 78-87. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>

9. Hemant Mistry. Sustainable Aviation Fuel. IATA, 2023. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/presentations/saf-gmd2023/>
10. Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I. Perspektyvy vykorystannia biopalyv drugoho pokolinnia yak aviatsiinoho palyva [Prospect for the use of second generation biofuels as jet fuel.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 44, № 2 (2022), P. 54-63. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.7>
11. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. COM (2020) 789 final, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0789>
12. Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804>
13. Doliente S.S., Narayan A., Tapia J.F.D. et al. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components // Front. Energy Res. – 2020, v. 8, art. 110. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110>
14. CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology, version 4, November 2021. bit.ly/3XbmFxr
15. Fourth IMO GHG Study 2020. IMO, 2021. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf
16. Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo oboviazkovosti vykorystannia ridskoho biopalyva (biokomponentiv) u haluzi transportu». [Law of Ukraine "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding Mandatory Use of Liquid Biofuel (Biocomponents) in the Transport Industry".]. No. 3769-IX dated 04.06.2024. (Ukr.) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3769-IX#Text>

Отримано 24.07.2024

Received 24.07.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024

УДК 662.767.2:546.11

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ НА ДІЮЧИХ ЗАВОДАХ УКРАЇНИ ТА ЄВРОПИ

Тракслер І.С.¹, канд. техн. наук, Потапова М.В.², канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, старший науковий співробітник, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514

²ПрАТ «МХП ЕкоЕнерджи», консультант, maryana.potapova2@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9689-3912

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.10>

У статті аналізуються стратегії Європейського Союзу щодо досягнення кліматичної нейтральності, з акцентом на використанні зеленого водню як ключового елемента енергетичної системи. Обговорюється потенціал інтеграції технологій виробництва зеленого водню та біометану для зниження викидів парникових газів і підвищення енергетичної незалежності. Окремо розглядаються перспективи біогазу та біометану як важливих компонентів у досягненні сталого розвитку та енергетичної безпеки України та Європи.

The article analyzes the European Union's strategies for achieving climate neutrality, with a focus on the utilization of green hydrogen as a key element of the energy system. The potential for integrating green hydrogen and biomethane production technologies to reduce greenhouse gas emissions and enhance energy independence is discussed. Additionally, the prospects of biogas and biomethane as critical components in achieving sustainable development and energy security in Ukraine and Europe are examined.

Бібл. 24, рис. 6.

Ключові слова: зелений водень, біогаз, біометан, відновлювані джерела енергії, декарбонізація, електроліз води, синтез метану, трансформація енергетичної системи.

На шляху до кліматично нейтральної Європи важливо оновити енергопостачання та створити інтегровану енергетичну систему відповідно до Європейської зеленої угоди. Зелений перехід економіки Європейського Союзу (ЄС) має забезпечити доступ до чистої, доступної та безпечної енергії. ЄС прагне значно зменшити викиди парникових газів і збільшити використання відновлюваних джерел енергії [1].

У липні 2020 року Європейська комісія запропонувала водневу стратегію, яка стане основою кліматично нейтральної енергетики до 2050 року [2]. Зелений водень, отриманий з відновлюваних джерел, відіграє ключову роль у досягненні цих цілей як засіб зберігання та носій енергії з нульовими викидами вуглецю [1]. У травні 2021 року депутати Європарламенту заявили, що лише зелений водень може стабільно сприяти кліматичній нейтральності в довгостроковій перспективі. Це вимагає значних інвестицій у інфраструктуру, дослідження та створення нормативних умов для розвитку ринку зеленого водню.

Перспективним напрямом є використання зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах, що сприяє зниженню викидів

парникових газів та енергетичній незалежності. Ці технології вже застосовуються на європейських заводах, демонструючи потенціал для масштабування. Впровадження інноваційних рішень, як електроліз води з використанням відновлюваної енергії та синтез метану, дозволяє знижувати викиди CO₂ та створювати додаткові можливості для зберігання енергії [1, 2].

Таким чином, інтеграція зеленого водню для виробництва біометану є важливим елементом стратегії переходу до чистої енергії та кліматично нейтральної економіки України та Європи.

1 Відновлювані зелені гази

Відновлювані гази, як-от біометан, е-метан, водень та їх похідні, є ключовими для секторів, які важко електрифікувати, і сприятимуть декарбонізації газового споживання в Європі до 2050 року. Водень матиме важливу роль у досягненні кліматичної нейтральності, але його виробництво потребує декарбонізації [3].

В Україні відновлювані гази сприятимуть енергетичній незалежності та зменшенню викидів парникових газів. Відповідно до «Меморандуму про взаєморозуміння» між Україною та ЄС, до 2030 року планується розвинути інфраструктуру для біометану та водню. Це партнерство передбачає узгодження

сертифікації імпорту відновлюваних газів за вимогами ЄС, усунення регуляторних бар'єрів та створення інвестиційної структури [4].

Виробництво водню впливає на викиди: «зелений» водень є екологічно чистим, тоді як «сірий» потребує технологій уловлювання та зберігання вуглецю (carbon capture and storage CCS). Інвестиції в водневу інфраструктуру є критичними для кліматичних цілей, а його інтеграція в газові мережі може зменшити викиди в промисловості та транспорті. Дослідження підкреслюють роль водню у сталому енергетичному майбутньому Європи [5, 6].

1.1 Водень

Водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті, і завдяки своїй реакційній здатності він існує на землі лише у таких сполуках, як вода та органічні матеріали. Вища теплотворна здатність водню становить 141,8 МДж/кг при 298 К, а нижня — 120 МДж/кг при тій же температурі. Це значно вище, ніж, наприклад, у бензину (47-48 МДж/кг при 298 К) [7].

Існують різні типи водню, зокрема «зелений водень», який виробляється шляхом електролізу води за використання відновлюваних джерел енергії, що не виділяє парникових газів. Використання водню, отриманого звичайними методами, може зменшити викиди вуглецю на 20%, а виробництво з відновлюваних джерел досягає нульових викидів [8].

Водень відіграє ключову роль у стабільності електромереж і використовується як паливо для промислових процесів та космічних ракет. У 2020 році понад 95% європейського водню виробляли з викопного палива, що щорічно виділяло 70-100 мільйонів тонн CO₂, тоді як частка зеленого водню становила менше 1% [3].

За прогнозами, до 2050 року водень може задовольнити до 18% світового енергетичного попиту, зменшуючи викиди CO₂ на 80-95% [8].

Вартість водню (H₂) варіюється від 0,8 до 4 доларів США за кілограм залежно від технології та вартості сировини. За даними Hydrogen Council 2020, водень у 2020 році забезпечував майже 8% глобального енергетичного попиту (GED – Global Energy Demand), при собівартості близько 2,50 доларів США за кілограм. До 2030 року очікується зниження вартості виробництва до 1,80 доларів за кілограм, що дозволить покрити до 15% GED [8].

Відомо понад 100 поточних і запланованих технологій виробництва водню, з яких понад 80% пов'язані з паровою конверсією викопного палива, а 70% – з природним газом. Усі шляхи виробництва водню показано на рис. 1 [10].

Отже, водень має потенціал стати ключовим елементом глобальної енергетичної системи завдяки своїй високій енергетичній щільності та здатності зменшувати викиди вуглецю. Його використання може задовольнити значну частину світового енергетичного попиту, особливо за умов розвитку технологій виробництва зеленого водню. До 2050 року водень може забезпечити до 18% світового попиту на енергію, сприяючи зменшенню викидів CO₂ та підвищенню енергоефективності. Подальший розвиток інфраструктури та технологій виробництва водню є критично важливим для досягнення цих цілей та переходу до сталого енергетичного майбутнього.

1.2 Біологічні гази: виробництво та перспективи

Біологічні гази включають біогаз і біометан, які отримуються з органічних відходів. Біогаз складається

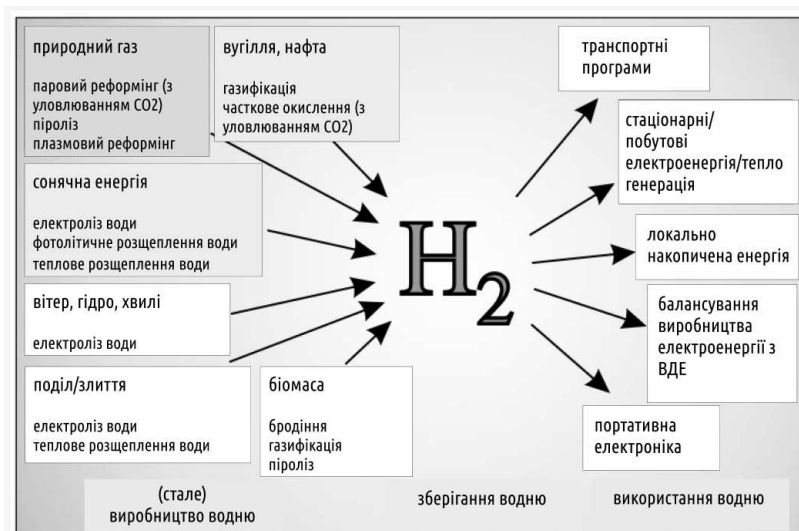


Рис. 1. Шляхи виробництва, транспортування та використання водню [10]

переважно з метану і вуглекислого газу, тоді як біометан— це очищений біогаз, що відповідає якості природного газу. Вони є відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), придатними для використання в енергетичних системах та як паливо для транспорту.

1.2.1 Біогаз

Біогаз має значний потенціал серед ланцюгів виробництва енергії. Нові підходи, розроблені в рамках Європейської зеленої угоди, такі як Стратегія ЄС щодо метану та Стратегія інтеграції енергосистеми, визнають біогаз провідним джерелом енергії, здатним замінити викопне паливо. Біогаз, як ВДЕ, підвищує продуктивність і стійкість АПК. Його виробництво стало актуальним через небезпечний вплив викопного палива на довкілля. Анаеробне зброджування забезпечує екологічне виробництво електроенергії, тепла та палива [11]. Склад біогазу включає метан (до 75%), вуглекислий газ (до 50%), водень, азот, водяну пару та сірководень у слідових концентраціях, і залежить від субстрату та умов анаеробного зброджування [12].

ЄС розробив стратегію декарбонізації до 2050 року, спрямовану на зниження викидів парникових газів на 40% порівняно з рівнем 1990 року та досягнення 27% частки ВДЕ [11]. Використання біогазу сприятиме зменшенню споживання природного газу.

Сьогодні попит на природний газ в ЄС складає 3380 ТВт·год. Основні споживачі – будівлі, промисловість та виробництво електроенергії (рис. 2). До 2050 року споживання природного газу значно скоротиться, залишаючи місце лише для технологій уловлювання та зберігання вуглецю [13].

Глобальний ринок біогазу суттєво зріс за останні десятиліття. Передові технології виробництва підтри-

муються як внутрішніми, так і міжнародними регуляторними заходами, включаючи фінансування досліджень, субсидії та гарантовані контракти на купівлю електроенергії, що створює конкурентний ринок [13].

До 2035 року ринок біогазу має досягти 8 млрд доларів із річним приростом 10% (Compound annual growth rate – CAGR). У 2022 році індустрія оцінювалась у 4 млрд доларів. Зменшення використання викопних палив та Паризька кліматична угода сприяють зростанню інтересу до біогазу.

Виробництво біогазу зросло з 78 до 364 ТВт·год (61 млрд м³) з 2000 по 2017 рік, причому Європа лідирує з 54% виробництва [14]. Країни, що розвиваються, використовують біогаз для побутових потреб, тоді як розвинені країни—для виробництва електроенергії або біометану [15].

Європа, маючи близько 18000 установок та 12,6 ГВт потужності у 2018 році, лідирує у виробництві електроенергії з біогазу, випереджаючи США (2,4 ГВт) та Китай (0,6 ГВт). Частка Європи становить 68% світової біогазової потужності у 18,1 ГВт [14].

До кінця 2020 року в Україні було введено в експлуатацію 68 промислових біогазових станцій із загальною потужністю 105 МВт [16].

Біогазові технології пропонують багатofunkціональні рішення для промислового та соціального секторів, зокрема для ТЕЦ, виробництва водню та паливних елементів (рис. 3) [15].

Виробництво біогазу має значний потенціал у якості заміни природного газу. Це ВДЕ, яке може покращити сталий розвиток і економіку, зокрема на тваринницьких фермах і в домашніх господарствах [25].

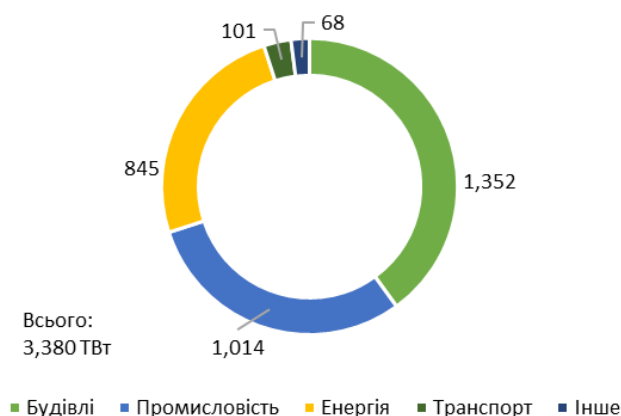


Рис. 2. Внутрішнє споживання у 2022 році у нижчій теплотворній здатності на основі даних Євростату [13]

Біогаз виробляється за потребою, може зберігатися та перетворюватися на висококалорійний біометан. Використання відходів як сировини для його генерації також сприяє вирішенню проблем управління відходами.

У 2018 році потужність біогазової індустрії Німеччини сягала 6,2 ГВт, Італії – 1,4 ГВт, Великобританії – 1,7 ГВт. Ці показники свідчать про значні інвестиції у відновлювану енергію, особливо в Німеччині, яка випереджає США [11].

Технологія біогазу відіграє ключову роль у сферах управління відходами, відновлюваної енергії та продовольчої безпеки, сприяючи зростанню доходів у сільських районах і створенню нових робочих місць.

1.2.2 Біометан

Біометан — очищена версія біогазу, отримана внаслідок розщеплення органічних речовин. Він є ключовим відновлюваним джерелом газу для декарбонізації енергосистеми ЄС.

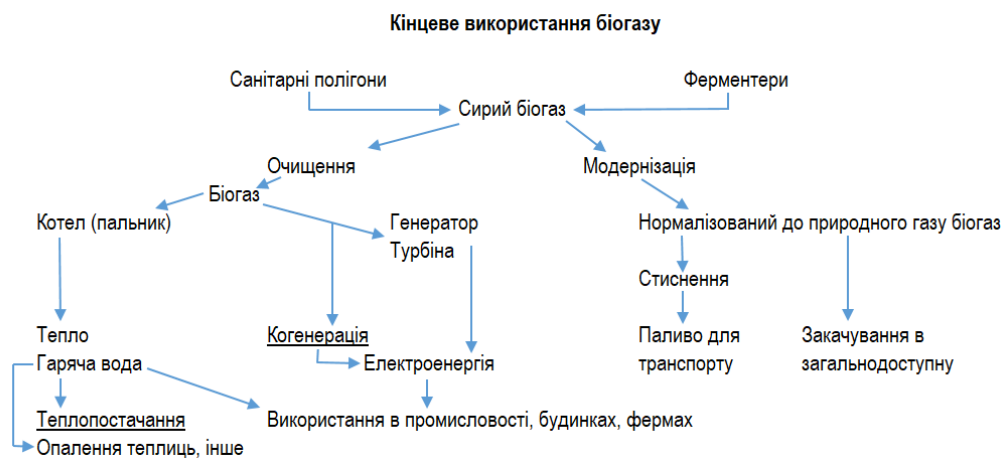


Рис. 3. Огляд використання біогазу [15]

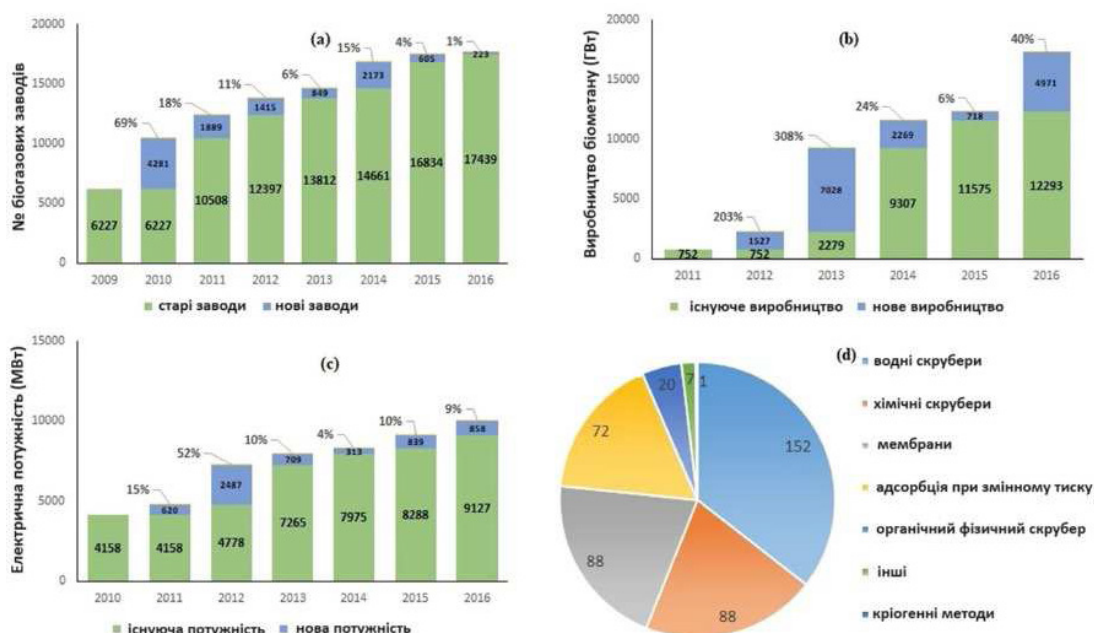


Рис. 4. (а) Кількість діючих біогазових установок у Європі та їх ріст (базуючись на даних Європейської біогазової асоціації (ЄБА)); (b) Електрична потужність наявних біогазових установок та її зростання (базуючись на даних з ЄБА); (c) Обсяг виробництва біометану в Європі (взято з ЄБА); та (d) кількість біометанових заводів з модернізованою технологією в Європі [19]

Хоча постачання електроенергії та тепла з біогазу було важливим в останнє десятиліття, нині увага зміщена на біометан. Очікується, що ця тенденція посилиться, оскільки біометан – універсальний енергоносіє для транспорту, промисловості, енергетики та опалення [17].

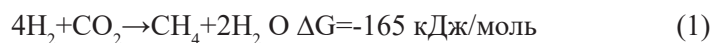
Біометан сприяє стійкому сільському господарству та може генерувати негативні викиди [13]. Він утворюється з субстратів, таких як залишки врожаю та органічні побутові відходи, що зменшує кількість біовідходів на звалищах. Його можна використовувати в мережах природного газу, для транспорту або на когенераційних установках [18].

В останні роки дослідження з очищення та обробки біогазу помітно зростають. Кількість установок, їхня потужність та виробництво біометану значно збільшилися. Основні методи очищення включають водне очищення, хімічну абсорбцію, мембранні технології та біологічні методи, рис. 4 [19].

Технології виробництва біогазу мають значний потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, але зростає інтерес до біометану, який зменшує залежність від теплової енергії.

Сталий біометан виробляється з органічних та сільськогосподарських відходів, що відповідає цілям циклічної економіки та не впливає на продовольчу безпеку [20]. Біологічні технології перетворюють CO₂ у біогазі на метан за допомогою водню, який виробляється шляхом електролізу. Перспективними методами є гідрогенотрофне відновлення CO₂ і фотосинтетична асиміляція CO₂ [21].

Анаеробне зброджування зміщується від виробництва тепла й електроенергії до біометану. Традиційні методи модернізації біогазу включають відділення і викидання CO₂, що призводить до втрати вуглецю. Альтернативою є введення водню безпосередньо в метантенк, де CO₂ перетворюється на метан завдяки гідрогенотрофним метаногенам за реакцією Сабат'є (рівняння 1). Цей метод, відомий як біометанування, не потребує додаткових реакторів, оскільки поживні речовини вже наявні в органічному матеріалі. Синтетичний відновлюваний метан, утворений біометануванням, має 78% енергетичної цінності вихідного водню та економить близько 10% енергії, яка йде на традиційне очищення газу [22].



ЄС інвестує в біометан для енергетичної безпе-

ки. До 2030 року планується виробляти 35 мільярдів кубометрів біометану, інвестувавши 83 мільярди євро. Перший транш у 18 мільярдів євро підтримує розвиток 5,000 нових установок у країнах ЄС і за його межами, зокрема в Україні [23].

Програма Horizon 2020 спрямовує інвестиції на дослідження біометану, підтримуючи інноваційні технології в цій галузі через проект Biomethaverse, який сприяє співпраці наукових і промислових партнерів.

2. Стан біометанової галузі в Європі

У 2018 році в Європі діяло близько 18 000 біогазових і 610 біометанових установок із загальною потужністю понад 11 000 МВт, що генерували 65 ТВт•год електроенергії. Більшість із них використовувалась для виробництва електроенергії й тепла, але частка біометану постійно зростає [13].

У березні 2019 року Gas for Climate оприлюднив дослідження Navigant з двома сценаріями для досягнення кліматичної нейтральності в Європі до 2050 року. Оптимізований газовий сценарій передбачає збільшення виробництва біометану до 1170 ТВт•год і водню до 1710 ТВт•год, що дозволить заощаджувати понад 200 мільярдів євро щорічно [13]. До квітня 2023 року в Європі діяло 1322 біометанові установки [20].

В Україні потужність заводів, готових до експорту біометану, становить майже 80 млн куб. м, і очікується зростання кількості заводів з 2025 року. Прогнозується, що найближчим часом біометан віддаватимуть в мережу 5 заводів, а з 2025 року їхня кількість значно зросте [24].

За новим звітом Європейської біогазової асоціації, виробництво біометану в Європі зросло на 20% у 2022 році, досягнувши 4,2 млрд кубометрів. Загальне виробництво біогазу та біометану досягло 21 млрд кубометрів у цьому ж році, що становить 6% споживання природного газу в ЄС. У 2022 році також вироблено 31 млн тонн дигестату, який забезпечив 15% попиту ЄС на азотні добрива, зекономивши 10 млн тонн CO₂ еквіваленту та 2 млрд кубометрів природного газу [17].

Виробництво біометану подвоїлося з 2018 по 2022 рік (рис. 6), причому Франція, Італія, Данія та Великобританія є країнами, що розвиваються найшвидше [20].

Вартість виробництва біометану варіюється від 70 євро/МВт•год до 90 євро/МВт•год (від 0,65 євро/м³ до 0,90 євро/м³) в середньому в 2020 році [13].

До 2030 року планується збільшення виробництва біогазу та біометану з 18,4 млрд кубометрів у 2021 році до 35-45 млрд кубометрів, а до 2050 року — до 95-167 млрд кубометрів. Це узгоджується з планом REPowerEU, який передбачає виробництво

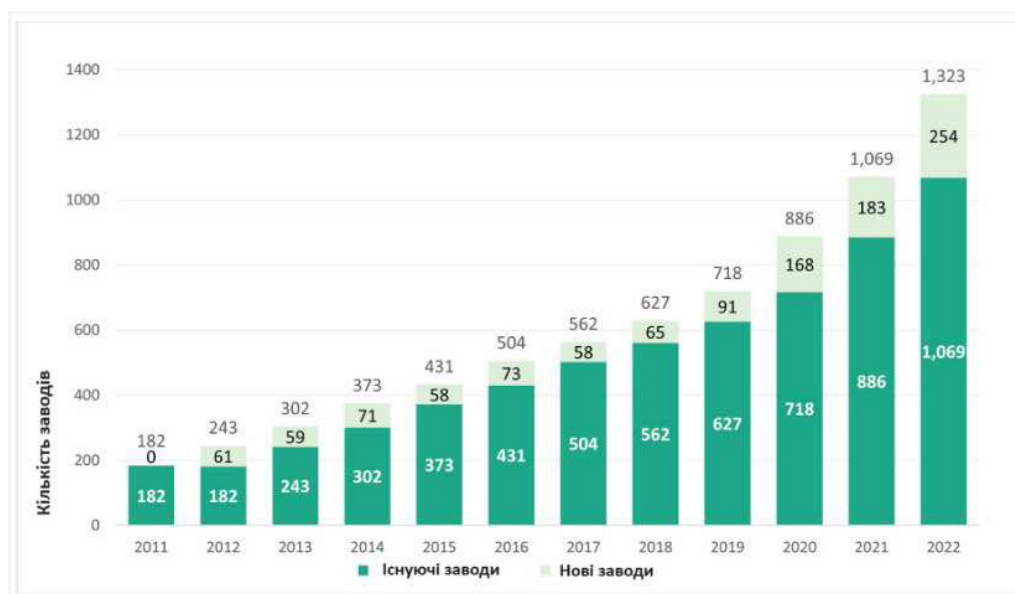


Рис. 5. Зростання кількості біометанових заводів у Європі. (Адаптовано з ЄБА) [20]



Рис. 6. Європейське виробництво біометану в ЄС-27 та Європі. (Адаптовано з ЄБА) [20]

35 млрд кубометрів біометану на рік до 2030 року, підвищуючи енергетичну безпеку ЄС. До 2050 року біометан може покрити 23-41% попиту на газ в ЄС, при прогнозованому зниженні споживання газу до 271 млрд кубометрів [17].

Консервативні оцінки вказують, що виробництво біометану за рахунок біометанізації водню може зрости на 20-40%. Це залежить від доступності водню, ефективності метанізації та інтеграції з існуючою інфраструктурою. Ключові фактори — це джерело водню, ефективність технології метанування та вміст CO₂ у сирому біогазі (50-60% метану, 40-50% CO₂) [17].

Висновки

У статті розглянуто потенціал використання зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах в Україні та Європі. Інноваційні технології, як-от електроліз води з відновлюваною енергією для виробництва водню, та його перетворення в метан мають значний потенціал для зменшення викидів парникових газів і підвищення енергетичної ефективності.

Впровадження цих технологій зменшить залежність від імпортованих викопних палив і сприятиме сталому енергетичному переходу, що узгоджується з цілями

ЄС щодо кліматичної нейтральності. Окрім того, застосування зеленого водню створить нові робочі місця у секторі відновлюваної енергетики та сприятиме інноваційному розвитку.

Необхідно також забезпечити сприятливе регуляторне середовище для підтримки інновацій та інвестицій у сектор водню та біогазу. Це пришвидшить перехід до зеленої енергетики і зміцнить енергетичну безпеку Європи у майбутньому.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Bioeconomy*. (2020). Communication COM/2020/301: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | Knowledge for policy. Retrieved from https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020301-hydrogen-strategy-climate-neutral-europe_en
2. *European Environment Agency*. (2021). Total greenhouse gas emissions trends and projections in Europe. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-8>
3. *European Biogas Association*. (2023). Biohydrogen: affordable, green and yet overlooked. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/biohydrogen-affordable-green-and-yet-overlooked/>
4. *Bioenergy Association of Ukraine*. (2023, July 7). Ukraine-EU memorandum on strategic partnership in biomethane, hydrogen, and other synthetic gases. Retrieved from <https://uabio.org/news/14401/>
5. *Vidas, L., Castro, R., & Pires, A.* (2022). A review of the impact of hydrogen integration in natural gas distribution networks and electric smart grids. *Energies*, 15(9), 3160. <https://doi.org/10.3390/en15093160>
6. *Zhang, Y., Davis, D., & Brear, M. J.* (2022). The role of hydrogen in decarbonizing a coupled energy system. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131082>
7. *Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W.* (2021). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 153–188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
8. *Sharma, S., Agarwal, S., & Jain, A.* (2021). Significance of hydrogen as economic and environmentally friendly fuel. *Energies*, 14(21), 7389. <https://doi.org/10.3390/en14217389>
9. *IEA*. (2023, April 1). Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity – Analysis. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>
10. *Edwards, P., Kuznetsov, V., & David, W.* (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions - Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences/Philosophical Transactions - Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 1043–1056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>
11. *Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Kapsdorferová, Z., Rokicki, T., Parzonko, A., & Holden, L.* (2024). Perspectives of Electricity Production from Biogas in the European Union. *Energies*, 17(5), 1169. <https://doi.org/10.3390/en17051169>
12. *Pavičić, J., Mavar, K. N., Brkić, V., & Simon, K.* (2022). Biogas and biomethane production and usage: technology development, advantages and challenges in Europe. *Energies*, 15(8), 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
13. *European Biogas Association*. (n.d.). Gas Decarbonisation Pathways 2020-2050. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/2020-gas-decarbonisation-pathways-study/>
14. *Біоенергетична асоціація України*. (2024). Прогноз розвитку біогазового сектору до 2035 року. Retrieved from <https://uabio.org/materials/15681/>
15. *Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmaeilion, F., Assad, M. E. H., Hajilounezhad, T., Jamali, D. H., Hmida, A., Ozgoli, H. A., Safari, S., AlShabi, M., & Bani-Hani, E. H.* (2021). A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>
16. *Ukrainian Biofuel Association*. (n.d.). Biogas technologies. Retrieved from <https://uabio.org/materials/7453/>
17. *European Biogas Association*. (n.d.). EBA Statistical Report 2023. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
18. *D'Adamo, I., & Sassanelli, C.* (2022). Biomethane community: A research agenda towards sustainability. *Sustainability*, 14(8), 4735. <https://doi.org/10.3390/su14084735>
19. *Khan, M. U., Lee, J. T. E., Bashir, M. A., Dissanayake, P. D., Ok, Y. S., Tong, Y. W., Shariati, M. A., Wu, S., & Ahring, B. K.* (2021). Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 149, 111343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>

20. López, A. F., Rodríguez, T. L., Abdolmaleki, S. F., Martínez, M. G., & Bugallo, P. M. B. (2024). From biogas to biomethane: An in-depth review of upgrading technologies that enhance sustainability and reduce greenhouse gas emissions. *Applied Sciences*, 14(6), 2342. <https://doi.org/10.3390/app14062342>
21. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2021). In situ biogas upgrading by CO₂-to-CH₄ bioconversion. *Trends in Biotechnology*, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
22. Tao, B., Alessi, A. M., Zhang, Y., Chong, J. P., Heaven, S., & Banks, C. J. (2019). Simultaneous biomethanisation of endogenous and imported CO₂ in organically loaded anaerobic digesters. *Applied Energy*, 247, 670–681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.058>
23. *European Biogas Association*. (2023, October 25). Biomethane investments worth EUR 18 billion in the pipeline. *Bioenergy International*. Retrieved from <https://bioenergyinternational.com/biomethane-investments-worth-eur-18-billion-in-the-pipeline-eba/>
24. *Agroportal*. (n.d.). Потужність біометанових заводів, які готові до експорту, становить 80 млн куб. м. *АгроПортал*. Retrieved from <https://agroportal.ua/news/novosti-kompanii/potuzhnist-biometanovih-zavodiv-yaki-gotovi-do-eksportu-stanovit-80-mln-kub-m>

REVIEW OF GREEN HYDROGEN TRANSFORMATION TECHNOLOGIES FOR INCREASING BIOMETHANE PRODUCTION AT EXISTING PLANTS IN UKRAINE AND EUROPE

Tracksler I.S.¹, Potapova M.V.²

¹PhD (Engin.), Institute of Technical Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist Street, Kyiv, 03057, Ukraine, ORCID: 0009-0006-6485-3514

²PhD (Engin.) Private Joint-Stock Company «MHP Eco Energy», 6a, Akademika Knyshova (Amurska) Street, Kyiv, 02152, Ukraine consultant, ORCID: 0000-0001-9689-3912

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>

Objective: The objective of this review is to analyze the technologies for transforming green hydrogen to enhance biomethane production at existing plants in Ukraine and Europe, and to assess their potential in the context of achieving climate neutrality and energy independence.

Tasks:

1. Evaluate the European Union's strategies for achieving climate neutrality with an emphasis on the use of green hydrogen.

2. Examine the technologies for integrating green hydrogen into biomethane production at operational biogas plants.

3. Analyze the prospects and challenges of implementing such technologies in Ukraine and Europe.

Research Methods: To achieve the objectives, methods of review analysis, comparison of existing technologies, and assessment of their economic and environmental effectiveness were used. Information was gathered from scientific publications, official reports of the European Union, as well as data on the current state and prospects of the biogas and biomethane market.

Results: The article analyzes EU strategies aimed at achieving climate neutrality by 2050 through the active use of green hydrogen. Green hydrogen, produced from renewable energy sources, is a key component in the decarbonization of energy systems. Integrating green hydrogen into biomethane production allows for significant reductions in greenhouse gas emissions and enhances energy independence.

European plants are already successfully employing water electrolysis and methane synthesis technologies to

convert CO₂ into biomethane. These technologies provide additional opportunities for energy storage and reduction of CO₂ emissions. Technologies such as hydrogenotrophic CO₂ reduction have shown high potential in biomethane production using green hydrogen.

In Ukraine, the development of biomethane and hydrogen infrastructure is also outlined in the "Memorandum of Understanding" with the EU. These investments are expected to contribute to the country's energy independence and reduction of greenhouse gas emissions. However, achieving this potential requires overcoming regulatory barriers and securing appropriate investments.

Thus, integrating green hydrogen into biomethane production is an important step towards clean energy and sustainable development both in Ukraine and in Europe. Further research and investment in this field will contribute to achieving climate goals and enhancing energy security.

References 24, Figures: 6.

Key words: green hydrogen, biogas, biomethane, renewable energy sources, decarbonization, water electrolysis, methane synthesis, energy system transformation.

1. *Bioeconomy*. (2020). Communication COM/2020/301: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | Knowledge for policy. Retrieved from https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020301-hydrogen-strategy-climate-neutral-europe_en

2. *European Environment Agency*. (2021). Total greenhouse gas emissions trends and projections in Europe. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-8>

3. *European Biogas Association*. (2023). Biohydrogen: affordable, green and yet overlooked. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/biohydrogen-affordable-green-and-yet-overlooked/>

4. *Bioenergy Association of Ukraine*. (2023, July 7). Ukraine-EU memorandum on strategic partnership in biomethane, hydrogen, and other synthetic gases. Retrieved from <https://uabio.org/news/14401/>

5. *Vidas, L., Castro, R., & Pires, A.* (2022). A review of the impact of hydrogen integration in natural gas distribution networks and electric smart grids. *Energies*, 15(9), 3160. <https://doi.org/10.3390/en15093160>

6. *Zhang, Y., Davis, D., & Brear, M. J.* (2022). The role of hydrogen in decarbonizing a coupled energy system. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131082>

7. Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2021). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 153–188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
8. Sharma, S., Agarwal, S., & Jain, A. (2021). Significance of hydrogen as economic and environmentally friendly fuel. *Energies*, 14(21), 7389. <https://doi.org/10.3390/en14217389>
9. IEA. (2023, April 1). Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity – Analysis. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>
10. Edwards, P., Kuznetsov, V., & David, W. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions - Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences/Philosophical Transactions - Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 1043–1056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>
11. Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Kapsdorferová, Z., Rokicki, T., Parzonko, A., & Holden, L. (2024). Perspectives of Electricity Production from Biogas in the European Union. *Energies*, 17(5), 1169. <https://doi.org/10.3390/en17051169>
12. Pavičić, J., Mavar, K. N., Brkić, V., & Simon, K. (2022). Biogas and biomethane production and usage: technology development, advantages and challenges in Europe. *Energies*, 15(8), 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
13. European Biogas Association. (n.d.). Gas Decarbonisation Pathways 2020-2050. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/2020-gas-decarbonisation-pathways-study/>
14. Bioenergetychna asotsiatsiia Ukrainy. (2024). Prohnoz rozvytku biohazovoho sektoru do 2035 roku [Forecast of the Biogas Sector Development until 2035]. Retrieved from <https://uabio.org/materials/15681/> (in Ukr.)
15. Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmaeilion, F., Assad, M. E. H., Hajilounezhad, T., Jamali, D. H., Hmida, A., Ozgoli, H. A., Safari, S., AlShabi, M., & Bani-Hani, E. H. (2021). A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>
16. Ukrainian Biofuel Association. (n.d.). Biogas technologies. Retrieved from <https://uabio.org/materials/7453/>
17. European Biogas Association. (n.d.). EBA Statistical Report 2023. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
18. D'Adamo, I., & Sassanelli, C. (2022). Biomethane community: A research agenda towards sustainability. *Sustainability*, 14(8), 4735. <https://doi.org/10.3390/su14084735>
19. Khan, M. U., Lee, J. T. E., Bashir, M. A., Dissanayake, P. D., Ok, Y. S., Tong, Y. W., Shariati, M. A., Wu, S., & Ahring, B. K. (2021). Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 149, 111343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>
20. López, A.F., Rodríguez, T.L., Abdolmaleki, S.F., Martínez, M.G., & Bugallo, P. M. B. (2024). From biogas to biomethane: An in-depth review of upgrading technologies that enhance sustainability and reduce greenhouse gas emissions. *Applied Sciences*, 14(6), 2342. <https://doi.org/10.3390/app14062342>
21. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2021). In situ biogas upgrading by CO₂-to-CH₄ bioconversion. *Trends in Biotechnology*, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
22. Tao, B., Alessi, A. M., Zhang, Y., Chong, J. P., Heaven, S., & Banks, C. J. (2019). Simultaneous biomethanisation of endogenous and imported CO₂ in organically loaded anaerobic digesters. *Applied Energy*, 247, 670–681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.058>
23. European Biogas Association. (2023, October 25). Biomethane investments worth EUR 18 billion in the pipeline. Bioenergy International. Retrieved from <https://bioenergyinternational.com/biomethane-investments-worth-eur-18-billion-in-the-pipeline-eba/>
24. Agroportal. (n.d.). Potuzhnist' biometanovykh zavodiv, yaki hotovi do eksportu, stanovyt' 80 mln kub. m [Capacity of Biomethane Plants Ready for Export is 80 Million Cubic Meters]. AhroPortal. Retrieved from <https://agroportal.ua/news/novosti-kompanii/potuzhnist-biometanovih-zavodiv-yaki-gotovi-do-eksportu-stanovit-80-mln-kub-m> (in Ukr.)

Отримано 29.08.2024

Received 29.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024
Accepted for publication 14.11.2024