

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 45, № 1, 2023

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.
Єременко В.С.
Клименко В.М.
Круковський П.Г.
Кудря С.О.
Куц Ю.В.
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., Петрова Ж.О., Михайлик В.А.,
Петров А.І., Новікова Ю.П.

Термічний аналіз композитного палива5

Авраменко А.О., Ковецька Ю.Ю., Скіцько О.І.,
Олійник Л.В.

Конвективна нестабільність біорідини під дією
мікроорганізмів14

Халатов А.А., Фіалко Н.М., Тимченко М.П.

Енергокліматична безпека і енергозабезпечення
житлового сектору20

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

Застосування пульсаційного диспергатора як
гідродинамічного кавітаційного реактора для готування
водовугільного палива28

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Басок Б.І., Базєєв Є.Т.

Енергетика, наука і інженерія сьогодення: стан та
виклики розвитку35

Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В.

Аналіз перспектив та питань сталості виробництва
рідких моторних біопалив в ЄС та в Україні46

Драгнєв С.В., Желєзна Т.А., Гайдай О.І.

Перспективи використання альтернативних палив на
водному транспорті55

Крамар В.Г.

Технології збагачення біогазу та їх характеристики64

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Клименко В.М., Супрун Т.Т.

Техніко-економічний аналіз виробництва синтетичного
відновлюваного метану75

Пеньковий Т.О., Халатов А.А., Гориславець Ю.М.

Моделювання гідродинамічних і теплових процесів у
відбивній плавильній печі з вихровою камерою84

**Кондратюк В.А., Скалозубов В.І., Комаров Ю.О.,
Косенко С.І., Коньшин В.І.**

Підходи моделювання умов термоакустичної
нестійкості в нерівноважному двофазному теплоносії
ядерних реакторів91

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 45, № 1, 2023

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

A. Avramenko – Associated Editor

B. Basok

L. Vorobiov

V. Gorobec

L. Dekusha

V. Eremenko

V. Klimenko

P. Krukovsky

S. Kudrya

Y. Kuts

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., Petrova Zh.O., Mykhailyk V.A.,
Petrov A.I., Novikova Yu.P.**

Thermal analysis of composite fuel and its components5

**Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Skitsko O.I.,
Oliinyk L.V.**

Convective instability of biofluids under the action of
microorganisms14

Khalatov A., Fialko N., Tymchenko M.

Energy and climate security and energy supply of the
building stocks20

**Nedbailo A.E., Ivanytsky G.K., Tselen B.Ya.,
Radchenko N.L., Gozhenko L.P., Shchepkin V.I.**

Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic
cavitation reactor for preparation of coal water fuel.....28

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

Basok B.I., Bazeev E.T.

Energy, science and engineering today: the state and
challenges of development35

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.

Analysis of prospects and sustainability issues of liquid
motor biofuels production in the EU and in Ukraine46

Drahnev S.V., Zheliezna T.A., Haidai O.I.

Prospect for the use of biofuels in waterborne transport55

Kramar V.G.

Biogas upgrading technologies and their characteristics...64

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

Klimenko V.M., Suprun T.T.

Techno-economic analysis of synthetic renewable methane
production75

Penkovyi T.O., Khalatov A.A., Goryslavets Y.M.

Simulation of hydrodynamic and thermal processes in a
reverberatory furnace with a vortex flowchamber84

**Kondratyk V.A., Skalozubov V.I., Komarov U.O.,
Kosenko S.I., Konshin V.I.**

Approaches to modeling conditions of thermoacoustic
instability in non-equilibrium two-phase coolant of nuclear
reactors.....91

УДК 662.73

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ КОМПОЗИТНОГО ПАЛИВА

Снєжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України, Петрова Ж.О.², докт. техн. наук,
 Михайлик В.А.³, канд. техн. наук., Петров А.І.⁴, аспірант, Новікова Ю.П.⁵, аспірантка

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, професор
 Isnezhkin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, mhlk45@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2712-1382>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, monoton10@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4851-3115>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, yuliiyanovikova3@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.1>

В статті наведено результати досліджень термічного аналізу композитного палива на основі твердого залишку торфу після екстрагування та стебл кукурудзи. Визначено температурні інтервали та швидкість зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, вологість та вміст золи. Оцінено умовний тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин композитного палива та його компонентів.

This article presents the results of thermal analysis of composite fuel based on the solid residue of peat after extraction and corn stalks. Temperature intervals and speed of dehydration, thermal decomposition of organic and mineral substances, humidity and ash content were determined. The conditional thermal effect of thermal decomposition of organic substances of composite fuel and its components is estimated.

Бібл. 9, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: фрезерний торф, стебла кукурудзи, твердий залишок торфу після екстрагування.

ТЗФТ – твердий залишок фрезерного торфу;

СК – стебела кукурудзи;

Т – крива зміни температури зразка;

ТГ – крива маси зразка;

ДТГ – крива диференціальної термогравіметрії;

ДТА – крива диференціального термічного аналізу;

УТЕ – умовний тепловий ефект.

Вступ. Однієї з основних проблем сучасного світу – це пошук і надходження відновлювальних енергетичних ресурсів, які могли би скласти вагомую конкуренцію нафті і природному газу. В останні роки, людство вступає в еру біотехнології, що використовує відновлювану сировину для виробництва енергії та матеріалів. Ці нові технології дозволяють запобіганню забруднення навколишнього середовища, знижують об'єми викидів газів, які викликають парниковий ефект. Використання відновлювальних джерел енергії із відходів сільськогосподарської сировини відмічається в США, Японії, Бразилії, Китаї, Канаді, країнах ЄС.

Альтернативна енергетика розглядає біопаливо як варіант заміни традиційного – вугілля, нафти, природного газу і т.д. Біопаливо відноситься до поновлюваних видів енергії, його основна перевага – екологічність, а

сучасні методи виробництва дозволяють отримувати такі зразки палива, які за своїми характеристиками і вартістю перевершують традиційні [1].

Біопаливо розрізняють від агрегатного стану та вихідного матеріалу (рис. 1.). Залежно від агрегатного стану розрізняють три види біопалива: рідке, тверде та газоподібне. Залежно від вихідного матеріалу, що використовується для виробництва, біологічне паливо поділяють на кілька поколінь: першого покоління, другого покоління та третього покоління.

Біопаливо першого покоління виробляють здебільшого з джерел сировини, які відносяться до продуктової групи, що викликає хвилю критики, так як виробництво біопалива скорочує кількість продуктів і викликає зростання їх вартості. Інший недолік – такий вид біопалива достатньо дорогий, для його виробництва потрібна додаткова підтримка (субсидування) держави.

Біопаливо другого покоління виробляють з біомаси. Сучасні технології дозволяють отримати корисну сировину з волокнистої або деревної біомаси, в яких міститься лігнін або цукор, з яких надалі отримують біопаливо.

Для виробництва біопалива третього покоління використовують водорості. Водорості – високопродуктивне і одночасно – дешева сировина. Проблемним є питання відведення площ, на яких буде проводитися вирощування водоростей у промислових масштабах.

В Україні великі поклади торфу, який відноситься до твердого біопалива, але який використовують і як добриво.

Торф – органічна порода, що утворилася внаслідок неповного біохімічного розкладу відмерлих болотних рослин в умовах надлишкового зволоження при нестачі кисню, яка містить до 50 % мінеральних компонентів на суху речовину і які відносяться до біопалива другого покоління. Торф – геологічно наймолодша ланка в ланцюгу каустобіолітів „торф – буре вугілля – кам’яне вугілля – антрацит”, має найнижчий рівень карбонізації і, відповідно, найменше значення теплоти згорання. Поверхнєве розташування торфових родовищ та порівняно невеликі витрати на організацію і ведення видобувних робіт роблять цю корисну копалину потенційно ефективним місцевим видом палива [2]. Теплота згорання фрезерного торфу 9,0...9,7 МДж/кг і зольністю біля 20%.

В Україні запаси торфу мають промислове значення. Геологічні запаси складають 2,04 млрд. т, що еквівалентно 660 млрд. м³ природного газу [3].

Сьогодні торф, який містить велику кількість гумусових речовин більше використовують, як добрива для сільського господарства ніж як паливо. Ці речовини не водорозчинні і стають такими лише в лужному середовищі. Якщо з нього вилучати гумінові речовини, а залишок після екстракції спалювати, то цей унікальний природний ресурс можливо використовувати більш раціонально. Основний спосіб отримання гумінових речовин - це лужна реакція розчинами аміаку або гідрооксидами калію, натрію. Така обробка перетворює їх в водорозчинні солі - гумати калію або натрію з високою біологічною активністю [4]. І це більш ефективно ніж просто використовувати торф як добриво.

Гумінові кислоти є найважливішою складовою ґрунтового гумусу. Чим більше їх вміст, тим родючий ґрунт. Однак в природному стані гумінові кислоти нерозчинні в воді і малодоступні рослинам. Доступними вони стають тільки після непрямої дії – мінералізації ґрунту, коли вони переродилися в прості мінеральні сполуки або на лужних ґрунтах. Використання гумусових речовин в аграрному секторі забезпечує зростання врожайності на 25 – 40%, втричі прискорює відновлення гумусового шару ґрунтів.

Внаслідок зростання попиту на гумінові препарати необхідна організація їх промислового виробництва у

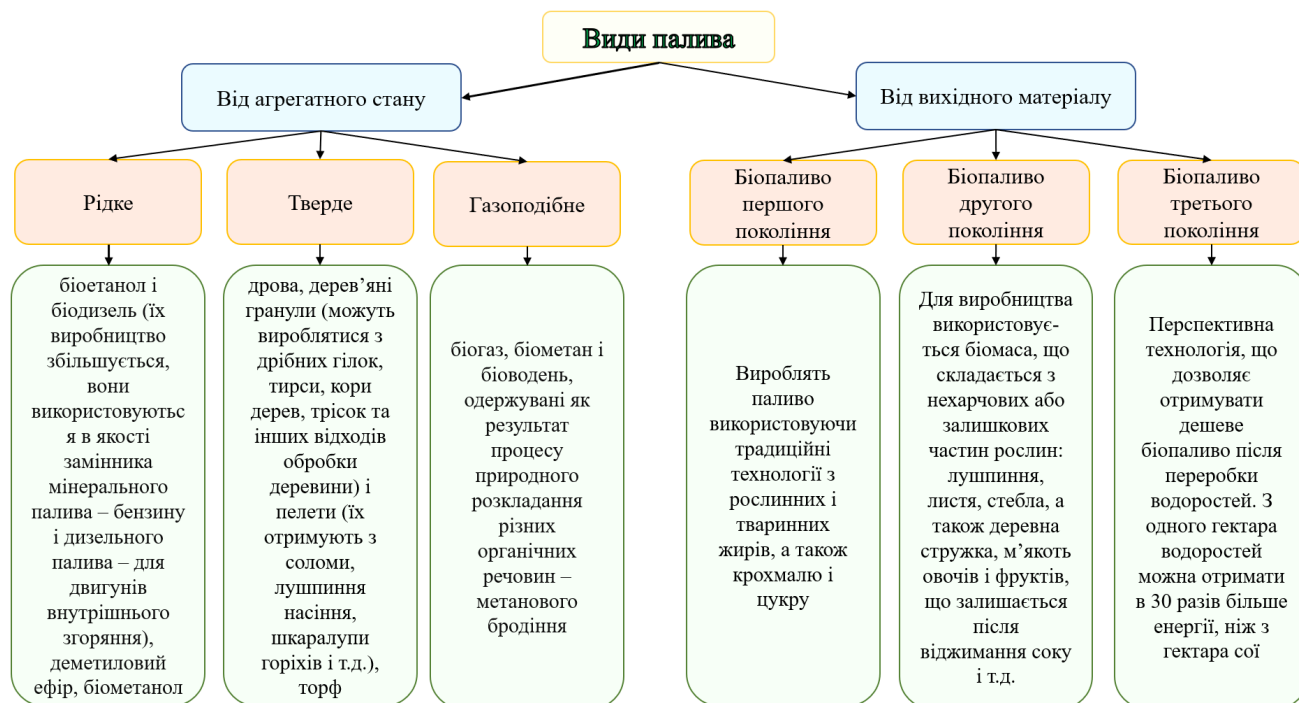


Рис. 1. Види палива

великих масштабах. Це дозволить швидше впровадити гумінові кислоти та інші препарати на їх основі в промисловість і сільське господарство [5].

Таким чином торф крім альтернативного виду палива є ще і ефективною сировиною для добрива. В ІТТФ НАН України розроблена теплотехнологія, яка дозволяє використовувати торф як паливо і добрива. Спочатку з торфу екстрагують гумінові речовини, а до залишеного після екстракції торфу додають біомасу і отримують композитне паливо з теплотворною здатністю понад 12,0 МДж/кг і зольністю біля 10%.

Метод і методика досліджень. Для досліджень використано відповідні матеріали, такі як фрезерний торф та поживні рештки кукурудзи з с. Сосонка Вінницька обл., для проведення експериментів (рис. 2). Фрезерний торф має теплоту згоряння 9,65 МДж/кг, початкову вологість 13,18 % та зольність 27,23%. Поживні рештки кукурудзи мають теплоту згоряння 14,0 МДж/кг, вологість 8,45% та зольність 3,5 %.

Згідно розробленої теплотехнології екстракція з торфу гумінових добрив полягає у підготовці зразка торфу. Наважку екстрагували відповідною концентрацією лугу гумінові кислоти, з подальшою нейтралізацією кислотою розчину. Після нейтралізації гумінові кислоти випадали в осад, розчин фільтрували, сушили і визначали загальну кількість гумінових речовин.

Після проведення екстрагування з фрезерного торфу було отримано твердий залишок (рис. 3, а) з вологістю 81,5%, зольністю 40% та рідкі гумінові добрива (рис. 3, б) в кількості 20%.

Поживні рештки кукурудзи подрібнювали до розміру 0,5 мм (рис. 3, в). Після цього проводиться змішування поживних решток кукурудзи та твердого залишку після екстрагування з торфу гумінових добрив в співвідношенні 1:1.

Створений композит залишали на деякий час для усереднення вологості суміші та фасували. Тепло- та згорання отриманого композитного біопалива біля 10,0 МДж/кг.

Термічний аналіз проводили в дериватографі Q-1000 системи Paulik-Paulik-Erdey (фірма «МОМ», Угорщина) в діапазоні 21...1003 °С при швидкості нагрівання 7,4 К/хв. Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель без стискання. Атмосферою слугувало нерухоме повітря. Як інертну речовину в тиглі порівняння використовували оксид алюмінію. Збір та обробку інформації здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Q-1500 mini».

Дериватографічний метод дозволяє отримати інформацію про зміни в матеріалах в умовах програмованого нагріву. Аналіз процесів термічного розкладання палив при нагріванні, здійснюється за кривими зміни



Рис. 2. Вихідна сировина: а) фрезерний торф; б) поживні рештки кукурудзи

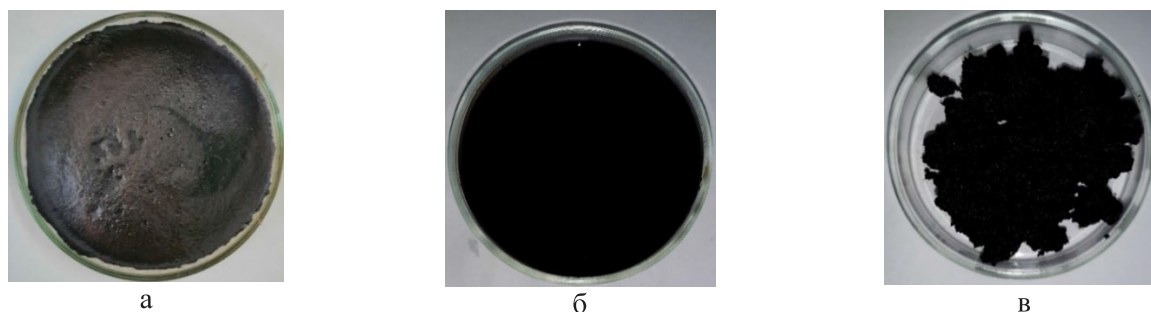


Рис. 3. Екстрагування гумінового залишку з торфу :
а) суміш торфу та розчину солей КОН після екстракції; б) рідкі гумінові добрива;
в) твердий залишок після екстракції

температури зразка (Т), його маси (ТГ), диференціальної термогравіметрії (ДТГ) та диференціального термічного аналізу (ДТА). Крива ДТА представляє різницю температур між зразком та інертним матеріалом, вона дає можливість ідентифікувати теплові процеси.

Результати досліджень. Процес термічного розкладання ТЗФТ, що представлений дериватограмою (рис. 4), має виражений стадійний характер.

Перша стадія – видалення води, що відбувається в інтервалі 23 – 184 °С. Маса гранули при цьому змінюється несуттєво, що свідчить про невисоку вологість зразка – 13,93 % (табл. 1). Максимальна швидкість зневоднення спостерігається при 82 °С. Зневоднення супроводжується ендотермічним ефектом, що представлений піком на кривій ДТА.

Друга стадія – термічне розкладання органічних речовин. Воно супроводжується активним газоутворенням та тепловою генерацією. Як було відмічено у попередніх дослідженнях [6], обробка торфуги розчином NaOH призводить не тільки до утворення розчинних у воді гумусових речовин (солей гумінових кислот), а й до якісних змін в органічних речовинах, що залишаються в твердому залишку. Тому термічне розкладання органічних речовин ТЗФТ на відміну від органіки вихідного торфуги відбувається в більш широкому температурному інтервалі і проходить в три етапи.

Перший етап знаходиться в інтервалі 184...324 °С, другий – 324...580 і третій – 580...786 °С. Середня швидкість розкладання на цих етапах, відповідно складає 0,97, 0,51 та 1,18 % СМ/хв. (табл. 2).

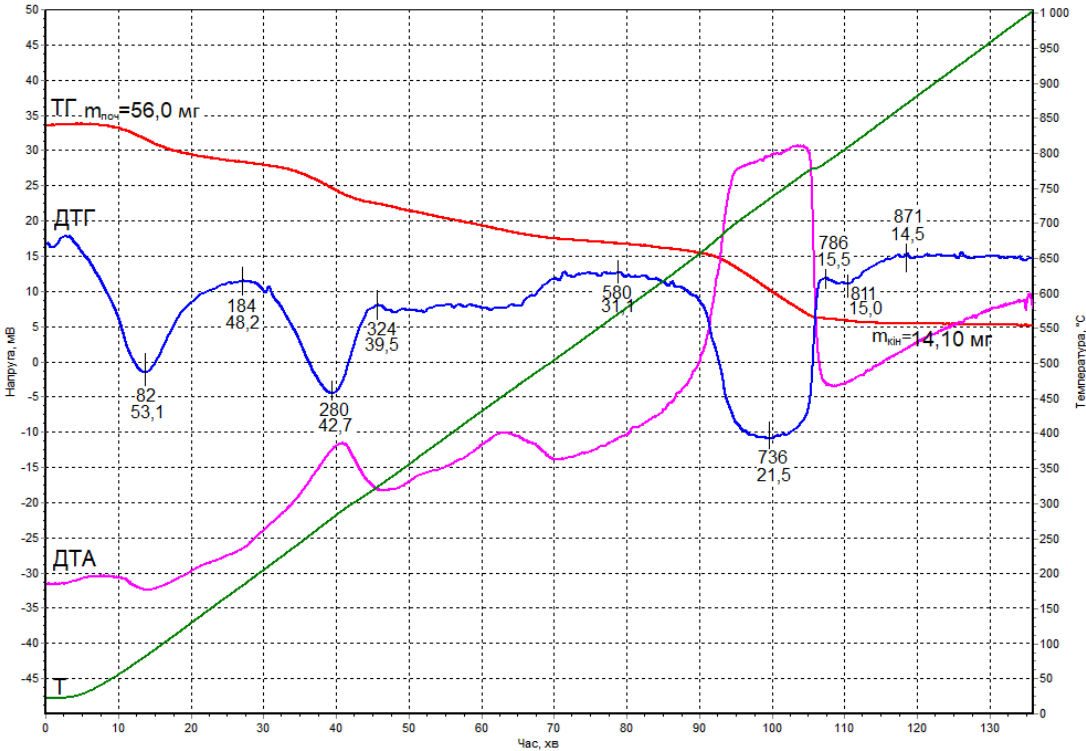


Рис. 4. Дериватограма твердого залишку фрезерного торфуги

Таблиця 1. Результати аналізу термічного розкладання

№ з/п	Матеріал	Видалення води		Термічне розкладання речовин				Зола
				органічних		мінеральних		
		інтервал, °С	вологість, %	інтервал, °С	вміст, % СМ	інтервал, °С	вміст, % СМ	% СМ
1	ТЗФТ	23–184	13,93	184–786	67,84	786–1002	2,91	29,25
2	СК	21–122	8,23	122–505	95,76	505–1002	0,98	3,26
3	Композитне паливо (50 % ТЗФТ +50 % СК)	21–145	12,55	145–752	82,75	752–1003	0,44	16,81

Після завершення розкладання органічних речовин в інтервалі 786...871 °С спостерігається термічна дисоціація карбонатів кальцію та магнію з виділенням CO_2 і утворенням оксидів Ca та Mg, яка супроводжується поглинанням теплоти.

Вміст золи в дослідженому зразку (29,25%) виявився досить високим. Результати визначення вологості, вмісту органічних і мінеральних речовин та зольності представлено в таблиці 1.

Зразок СК (рис. 5, табл. 1, 2) має кінетику термічного розкладання, яка характерна для рослинної сировини [7]. Повне зневоднення відбувається в інтервалі температур 21 – 122°С. Максимальна швидкість видалення води реєструється при 67°С. Термічне роз-

кладання органічних речовин відбувається в інтервалі 122 – 505°С і має виражені 2 етапи. На першому (122 – 355 °С) матеріал стрімко деградує, спостерігається висока швидкість розкладання (2,37 % СМ/хв.) з максимальним значенням при 302 °С та потужне зростання тепловиділення.

На другому етапі (355 – 505°С) швидкість розкладання органічних речовин зменшується до 1,21 СМ/хв. Подальше зростання температури (до 1002 °С) викликає незначну зміну маси.

Після завершення розкладання органічних речовин в інтервалі 786...871 °С спостерігається термічна дисоціація карбонатів кальцію та магнію з виділенням CO_2 і утворенням оксидів Ca та Mg, яка супроводжується поглинанням теплоти.

Таблиця 2. Кінетика розкладання органічних речовин

№ з/п	Матеріал	1 етап		2 етап		3 етап		Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.
		інтервал, °С	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	швидкість розкладання, % СМ/хв.	
1	ТЗФТ	184–324	0,97	324–580	0,51	580–786	1,18	0,85
2	СК	122–355	2,37	355–505	1,21	–	–	1,87
3	Композитне паливо (50 % ТЗФТ +50 % СК)	145–365	1,77	365–498	1,10	498–752	0,34	1,02

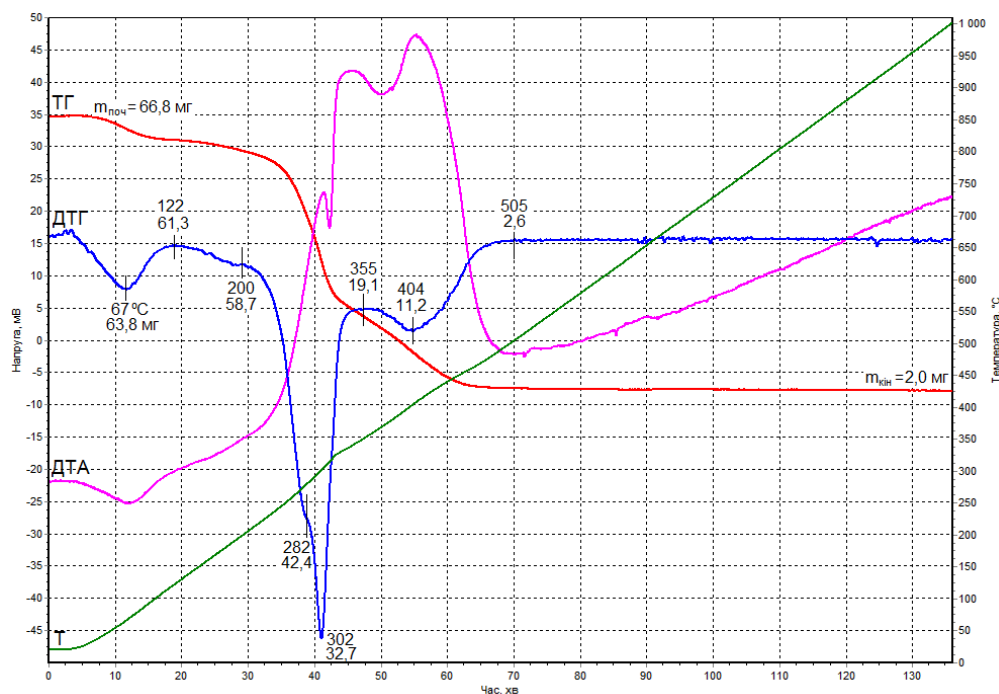


Рис. 5. Дериwатoгpаmа стебел кукурудзи

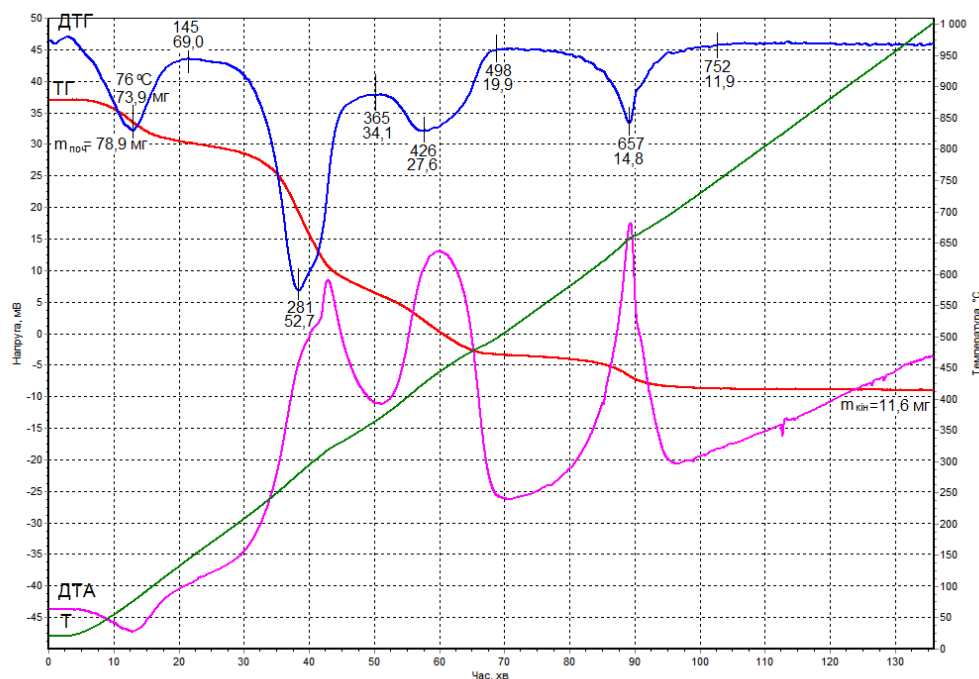


Рис. 6. Дериватограма композитного палива

Вміст золи в дослідженому зразку (29,25%) виявився досить високим. Результати визначення вологості, вмісту органічних і мінеральних речовин та зольності представлено в таблиці 1.

Зразок СК (рис. 5, табл. 1, 2) має кінетику термічного розкладання, яка характерна для рослинної сировини [7]. Повне зневоднення відбувається в інтервалі температур 21 – 122 °С. Максимальна швидкість видалення води реєструється при 67 °С. Термічне розкладання органічних речовин відбувається в інтервалі 122 – 505 °С і має виражені 2 етапи. На першому (122 – 355 °С) матеріал стрімко деградує, спостерігається висока швидкість розкладання (2,37 % СМ/хв.) з максимальним значенням при 302 °С та потужне зростання тепловиділення. На другому етапі (355 – 505 °С) швидкість розкладання органічних речовин зменшується до 1,21 СМ/хв. Подальше зростання температури (до 1002 °С) викликає незначну зміну маси.

Порівняно зі зразком ТЗФТ зразок СК має більшу у 2,2 рази інтенсивність термічного розкладання органічних речовин та у 9 разів меншу зольність.

Дериватограма композитного палива представлена на рисунку 6, а результати термічного аналізу в таблицях 1 та 2.

Видалення води закінчується при 145 °С, що на 39 °С нижче ніж у ТЗФТ та на 23 °С вище ніж у СК. Максимальна швидкість зневоднення реєструється при 76 °С.

Змішування ТЗФТ та СК призводить до зменшення інтервалу розкладання органічних речовин на 5 °С порівняно з ТЗФТ (табл. 1). Розкладання органічних речовин композитного палива проходить, як і у ТЗФТ, в 3 періоди. Проте сама кінетика розкладання має дещо іншу інтенсивність. В паливі інтенсивність розкладання, в порівнянні з ТЗФК, у 1,8 та 2,1 разів вище у першому і другому періодах відповідно і у 3,5 разів нижча у третьому (табл. 2).

Для кращого наочного сприйняття процесів, що відбуваються при термічному розкладанні композитного палива та його компонентів виконано суміщення кривих ДТА (рис. 7).

За методикою, що викладена в [8] було визначено умовний тепловий ефект (УТЕ) термічного розкладання органічних речовин композитного палива та його компонентів.

З даних таблиці 3 видно, що УТЕ термічного розкладання стебел кукурудзи на 5,7% вищий за УТЕ термічного розкладання твердого залишку фрезерного торфу. УТЕ термічного розкладання органічних речовин композитного палива виявився на 15,0% вищий за УТЕ термічного розкладання стебел кукурудзи.

Важливою характеристикою ефективності композитного палива є вартість одиниці енергії при його спалюванні. Якщо враховувати, що поживні рештки кукурудзи коштують до 1500 грн/т при теплотворній здатності 14,0 МДж/кг, а фрезерний торф коштує до

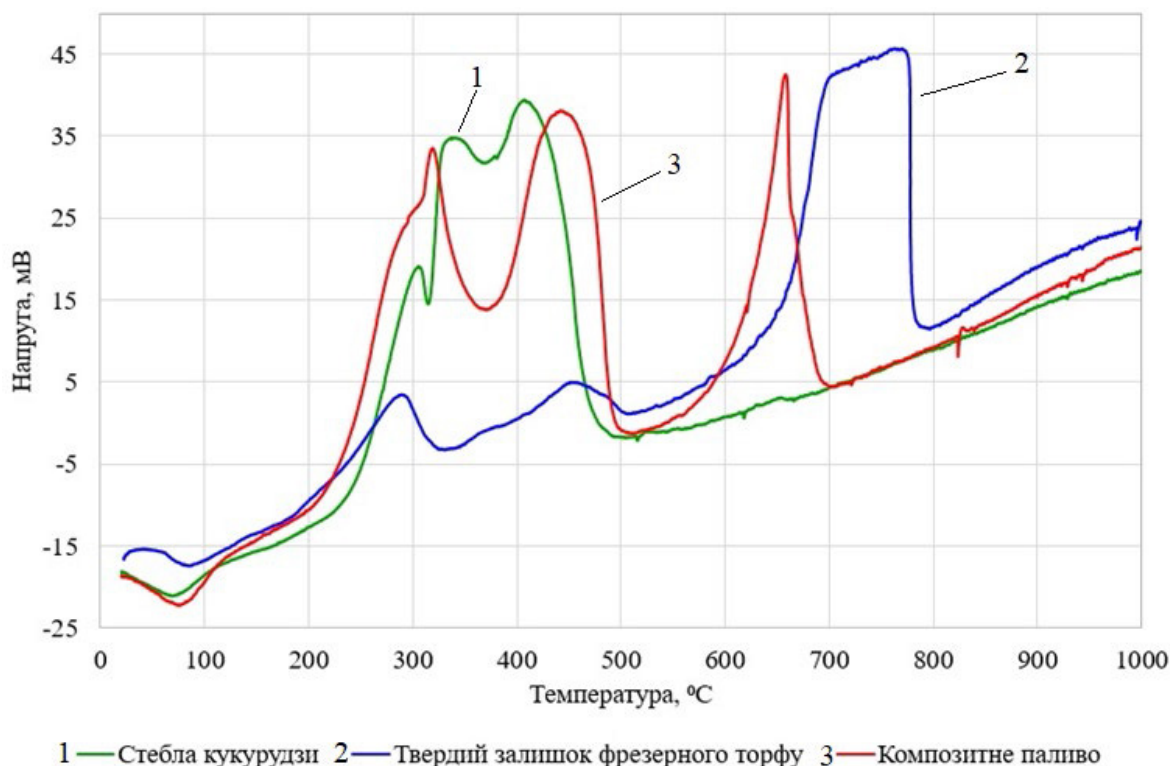


Рис. 7. Суміщені криві ДТА

Таблиця 3. Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин в зразках

№ з/п	Матеріал	Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання, мВ•с•мг ⁻¹ СМ
1	ТЗФТ	918,17
2	СК	970,23
3	Композитне паливо (50 % ТЗФТ +50 % СК)	1116,14

1300 грн/т при теплотворній здатності біля 9,6 МДж/кг, але після екстракції з нього гумінових речовин його теплотворна здатність зменшується менш ніж до 6,0 МДж/кг. Тоді підрахунки показують, що вартість одиниці енергії отриманого композитного палива враховуючи співвідношення компонентів 1:1 становить приблизно 140 грн/ГДж. Порівняння вартості одиниці енергії в різних енергоносіях в Україні наведене в роботі [9] показує, що вартість одиниці енергії композитного палива менша ніж у природного газу в 2 – 8 рази (в залежності від його вартості для населення чи промисловості), електричної енергії в 3 – 7 раз, вугілля в 1,5 рази, мазуту 2,1 рази, гранул з деревини 2,5 раз, гранул з лушпиння в 2,0 рази, деревної тріски в 1,2 рази і тільки дорожче за тюки соломи чи стебла кукурудзи в 1,4 рази. Але якщо вартість торфу віднести в розрахунок собі вартості отримання гумінових добрив тоді одиниця енергії цього композитного палива становить

75 грн/ГДж і вона буде в 1,4 рази менша ніж у тюків з соломи чи стебл кукурудзи. Ця суттєва різниця в ціні зумовлює ефективність розробленого композитного палива на основі торфу після екстракції з нього гумінових речовин та поживних решток кукурудзи.

Висновки. Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу досліджено композитне паливо та його компоненти: подрібнені твердий залишок фрезерного торфу після екстрагування з нього гумусових речовин та стебла кукурудзи.

Визначено температурні інтервали та швидкість зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, вологості та вміст золи.

Завершення термічного розкладання органічних речовин композитного палива відбувається на 34 °С нижче за відповідну температуру ТЗФТ, та на 247 °С вище – СК.

Загальна середня швидкість розкладання органічних речовин композиційного палива на 20% вища за швидкість розкладання ТЗФТ та на 45% нижча за швидкість розкладання СК.

Додавання до твердого залишку фрезерного торфу стебел кукурудзи в кількості 50% від загальної маси дозволяє отримати композитне паливо з зольністю, що у 1,7 рази нижча за зольність ТЗФТ.

Оцінено умовний тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин композитного палива та його компонентів. Виявлено, що УТЕ термічного розкладання органічних речовин композитного палива вищий за УТЕ компонентів палива. Пояснити цей феномен поки що не вдалося.

Створене композитне паливо, як показали проведені дослідження вартості одиниці енергії є ефективним альтернативним видом палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Біопаливо: види і джерела отримання*. Режим доступу: <https://eenergy.com.ua/baza-znan/biopalyvo-vydydzherela/>
2. Снєжкін Ю. Ф., Корінчук Д.М. Торф – ефективний альтернативний вид палива // Теплофізика та теплоенергетика. – 2022. – Т.44. – № 3. – С.5-15. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.1>
3. *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України*. НАН України. Інститут відновлюваної енергетики. – Київ, 2012 р. – 69 с.
4. Petrova Zh., Vyshnevskiy V., Novikova Yu. Nonwaste Technology of Receipt of Humic Fertilizers from Peat // Materials of the 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Proceedings), Ukraine, Lviv, June 24-28th, 2019. - Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. – P. 278-279. <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.278>
5. Sniezkin Yu., Petrova Zh., Novikova Yu., Petrov A. Technology of complex processing of peat // Енергетика та автоматика. – №5. – 2020. – С. 32-41. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.032>
6. Михайлик В.А., Снєжкін Ю.Ф., Корінчевська Т.В., Корінчук Д.М. Вивчення термічних властивостей твердого залишку торфу після екстрагування гумусових речовин // Промислова теплотехніка. – 2015. – Т. 37, – № 3. – С. 54-64.
7. Корінчевська Т.В., Михайлик В.А. Термічна деструкція гранульованого палива з міскантуса // Scientific Works. – 2020. – Т.84, Вип.1. – С. 10-15. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1862>
8. Михайлик В.А., Снєжкін Ю.Ф., Корінчук Д.М. Термічне розкладання гранул палива на основі торфу та деревини // Промислова теплотехніка. – 2014. – Т. 36, №2. – С. 11-19.
9. Гелетуша Г.Г. Желєзна Т.А., Драгнєв С.В. Можливості скорочення і заміщення споживання природного газу в централізованому теплопостачанні України // Теплофізика та Теплоенергетика. – 2022. – 45(2). – С. 64-69.

THERMAL ANALYSIS OF COMPOSITE FUEL AND ITS COMPONENTS

**Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Mykhailik V.A.,
Petrov A.I., Novikova Yu.P.**

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.1>

One of the main problems of the modern world is the search for and supply of renewable energy resources that could compete with oil and natural gas. In recent years, humanity has entered the era of biotechnology, which uses renewable raw materials for the production of energy and materials.

The energy industry considers biofuel and peat as alternative types of fuel. Biofuel is a renewable type of energy, its main advantage is environmental friendliness, and modern production methods make it possible to obtain fuel samples that often exceed traditional samples in terms of their characteristics and cost.

In Ukraine, there are large deposits of peat, which belongs to solid biofuel, and which is also used as fertilizer. Today, peat, which contains a large number of humic substances, is used more as fertilizer for agriculture than as fuel. These substances are not water-soluble and become so only in an alkaline environment. If humic substances are extracted from it, and the residue after extraction is burned, then this unique natural resource can be used more rationally.

The paper presents a study of thermal analysis of composite fuel based on the solid residue of peat after extraction of humic substances and corn stalks from it.

Composite fuel and its components were investigated using the methods of thermogravimetry and differential thermal analysis: crushed solid residue of milled peat after extraction of humic substances and corn stalks in an alkaline medium, and temperature intervals and rates of dehydration, thermal decomposition of organic and mineral substances, humidity and ash content were determined.

The conditional thermal effect of thermal decomposition of organic substances of composite fuel and its components is estimated. It was found that the conditional thermal effect of the thermal decomposition of organic substances of the composite fuel is higher than the conditional thermal effect of the fuel components.

It is shown that the created composite fuel is an effective alternative type of fuel, the cost per unit of energy of which is lower than that of traditional fuels.

Bibliograph. 9, tables 3, figures 7.

Key words: milled peat, corn stalks, solid residue of peat after extraction.

1. *Biopalyvo: vydy i dzherela otrymannia*. [Biofuel: types and sources of production]. Access mode: <https://energy.com.ua/baza-znan/biopalyvo-vydy-dzherela/> (Ukr.)

2. *Sniezhkin, Y., Korinchuk, D. M.* Torf – efektyvnyi alternatyvnyi vyd palyva [Peat is an effective alternative fuel]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(3), 5-15. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.1> (Ukr.)

3. *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh ta netradytsiinykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of the energy potential of renewable and non-traditional energy sources of Ukraine]. The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2012. 69p. (Ukr.)

4. *Petrova Zh., Vyshnevskyi V., Novikova Yu.* Nonwaste Technology of Receipt of Humic Fertilizers from Peat. Materials of the 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Proceedings), Ukraine, Lviv, June 24-28th, 2019. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. P. 278-279. <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.278>

5. *Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Novikova Yu., Petrov A.* Technology of complex processing of peat. *Energy and Automation*, 2020. №5. P. 32-41. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.032>

6. *Mykhailik V.A., Sniezhkin Yu.F., Korinchevska T.V., Korinchuk D.M.* Vyvchennia termichnykh vlastyvoستي tverdoho zalyshku torfu pislia ekstrakuvannya humusovykh rehovyn [Study of the thermal properties of the solid residue of peat after extraction of humic substances.]. *Promyslova teplotekhnika*, 2015. V. 37, № 3. P. 54-64. (Ukr.)

7. *Korinchevska T.V., Mykhailik V.A.* Termichna destruktsiia hranulovanoho palyva z miskantusa [Thermal destruction of miscanthus granulated fuel]. *Scientific Works*, 2020. V.84, Issue1. P. 10-15. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1862> (Ukr.)

8. *Mykhailik V.A., Sniezhkin Yu.F., Korinchuk D.M.* Termichne rozkladannia hranul palyva na osnovi torfu ta derevyny [Thermal decomposition of fuel pellets based on peat and wood.]. *Promyslova teplotekhnika*, 2014. V. 36, №2. P. 11-19. (Ukr.)

9. *Heletukha H.H., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.* Mozhlyvosti skorochennia i zamishchennia spozhyvannia pryrodnoho hazu v tsentralizovanomu teplopостachanni Ukrainy [Possibilities of reducing and replacing natural gas consumption in the centralized heat supply of Ukraine]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2022. V. 45(2). P. 64-69. (Ukr.)

Отримано 05.01.2023

Received 05.01.2023

УДК 532.536

КОНВЕКТИВНА НЕСТАБІЛЬНІСТЬ БІОРИДИНИ ПІД ДІЄЮ МІКРООРГАНІЗМІВ**Авраменко А.О.**, член-кореспондент НАН України, **Ковецька Ю.Ю.**, докт. філософ.,
Скіцько О.І., канд. техн. наук, **Олійник Л.В.***Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, Київ 03057, Україна*<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.2>

У статті представлена маломодова модель біоконвективної течії гіротаксичних мікроорганізмів. Завдання вирішувалося на основі підходу Лоренца. Модель дозволила визначити границі різних режимів руху середовища. Використовуючи аналітичні та чисельні методи, було виявлено чотири критерії стійкості біоконвективних потоків у вигляді чисел Рейля. Проаналізовано характер залежностей критичних чисел Рейля від числа Шмідта та геометричної структури мікроорганізмів.

The paper presents a low-dimensional model of bioconvective flow for gyrotactic microorganisms. The problem was solved based on the Lorenz approach. The model enabled determining boundaries of different flow regimes. With the help of analytical and numerical methods, three criteria for the stability of bioconvective flows were identified in the form of Rayleigh numbers. The features of the dependences of the critical Rayleigh numbers on the Schmidt number and the geometric structure of microorganisms are analyzed.

Бібл. 17, табл. 1.

Ключові слова: підхід Лоренца, дивний атрактор, гіротаксичні мікроорганізми, критерій стійкості.**Список позначень:**

B – параметр орієнтації;
 b_{max} – велика напіввісь мікроорганізму;
 b_{min} – мала напіввісь мікроорганізму;
 D – коефіцієнт дифузії мікроорганізмів;
 g – гравітаційне прискорення;
 h – висота каналу;
 N – концентрація мікроорганізмів;
 $N_0(y)$ – концентрація незбуреного середовища;
 $\bar{N}$ – середня концентрація;
 $n(t, x, y)$ – концентрація збуреного середовища;
 p – тиск;
 t – час;
 v – вектор швидкості;
 u, v – складові швидкості;

Грецькі символи:

ν – середній об'єм мікроорганізму;
 μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
 ρ – густина середовища;
 ρ_m – густина мікроорганізму;
 ψ – функція току;

Список позначень:

F_0 – число Фур'є;
 Pe – число Пекле;
 Ra – число Рейля;
 Sc – число Шмідта.

Вступ

Біоконвекція – явище макроскопічного конвективного руху рідкого середовища, створюваного градієнтом густини, викликаним спрямованим колективним плаванням мікроорганізмів. У цю групу входять бактерії, одноклітинні та колоніальні водорості, найпростіші. Мобільність є важливою фізіологічною властивістю мікроорганізмів, які шукають нове середовище для колонізації, подальшого зростання та розмноження. Їх рух може відбуватися за допомогою механічних процесів, таких як рух джгутіками. Відомо, що мікроорганізми можуть рухатися під дією гравітаційних сил (gyrotactic microorganisms), градієнта концентрації кисню

(oxytactic microorganisms), світлового випромінювання (phototaxis microorganisms), градієнта поживних речовин (chemotaxis microorganisms) тощо.

Сучасні дослідження процесу біоконвекції можна знайти в широкому спектрі галузей, таких як харчова, фармацевтична та хімічна промисловості, а також мікробіології та біотехнології [1-3]. Зокрема, мікроорганізми є швидкозростаючою біомасою і можуть бути перетворені на біодизельне паливо або біопаливо. Важливою групою мікробів є мікроорганізми (PGPM), які можуть виживати в ризосфері (корінні рослин) і стимулюють їх зростання. Тому PGPM часто використовуються у мікробних добривах, які використовуються для

підвищення врожайності екологічно безпечним способом. Ціанобактерії і еукаріотичні мікроводорості мають унікальні метаболічні властивості, їх штами важливі для навколишнього середовища через їх здатність до біорозкладання або біосорбції, що викликає інтерес у дослідницьких лабораторіях та промисловій діяльності. Для прогнозування перебігу цих процесів виникають проблеми, пов'язані з питаннями дослідженням нестійкості течії. У статті [4] розроблено модель термокапілярної нестабільності тонкої рідкої плівки нестійкості. У статті [5] проаналізовано вплив градієнта температури на стійкість біоконвекції у суспензії гіротактичних мікроорганізмів.

Актуальною областю досліджень є процес біоконвекції у нанорідинах для покращення конвекції. Переваги включення наночастинок в суспензію мобільних мікробів полягають у мікрооб'ємах, перемішуванні на мікрорівні та стабільності нанорідин. Існує потенціал використання мікроорганізмів з нанорідинами у різних біомікросистемах, мікропристроях тощо. Біоконвекція у присутності наночастинок спочатку розглядалася Кузнецовим та Авраменко [6-8]. Було визначено, що результуючий рух рідини, викликаний саморухомими мікроорганізмами, посилює перемішування і запобігає агломерації наночастинок в нанорідинах.

Біоконвекція у пористих середовищах – складний динамічний процес. Дослідження в роботах [9,10] проаналізовано вплив пористості на течію в каналах різної конфігурації та без біоконвекції. Однією з відмінних рис біоконвекції в пористих середовищах у порівнянні з гомогенною рідиною полягає в тому, що мікроорганізми можуть адсорбуватися пористим середовищем, що впливає на інтенсивність її розвитку. З іншого боку, адсорбовані мікроорганізми можуть відриватися від пористої матриці і повертатися в потік [11]. У статті [12] представлено континуальну модель термобіоконвекції окситатних бактерій в пористому середовищі. Використання методу Галеркіна для вирішення задачі лінійної стійкості дало можливість отримати залежність між критичним значенням числа Релея та «термічним» числом. Дослідження впливу вертикального перебігу на виникнення біоконвекції в суспензії гіротактичних мікроорганізмів в роботі [13] показало, що вертикальний наскрізний потік сприяє стабілізації системи.

Метою даної роботи є дослідження стійкості течії на основі підходу Лоренца [14] та визначення меж різних режимів течії двовимірної біоконвекції для гіротактичних мікроорганізмів.

1. Математична модель

Розглянемо біоконвективні процеси у плоскому двовимірному вертикальному каналі, висота якого h . У загальному вигляді рівняння для біоконвективного руху гіротактичних мікроорганізмів можна подати у вигляді [15]

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \hat{\mathbf{k}} N \Delta \rho g, \quad (1)$$

$$\text{div}(\mathbf{v}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) N = -\text{div}(N W_c \hat{\mathbf{p}} - D \nabla N), \quad (3)$$

де $\Delta \rho = \rho_m - \rho$, $\hat{\mathbf{p}}$ – одиничний вектор напрямку руху мікроорганізмів, $W_c \hat{\mathbf{p}}$ – вектор середньої швидкості руху мікроорганізмів щодо рідини (передбачається, що W_c є постійною величиною), $\hat{\mathbf{k}}$ – орт у напрямку y .

Представимо концентрацію мікроорганізмів як суму концентрацій незбуреного $N_0(y)$ та концентрацію збуреного $n(t, x, y)$ середовищ

$$N = N_0(y) + n(t, x, y), \quad (4)$$

де $N_0 = \bar{N} = \text{const}$, $\bar{N}$ – середня концентрація в шарі.

Для визначення одиничного вектора $\hat{\mathbf{p}}$ використовується наступна модель [15]

$$\hat{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{k}} + \hat{\mathbf{p}}'(t, x, y), \quad (5)$$

$$\mathbf{p}'(t, x, y) = (-B\xi, 0), \quad (6)$$

$$B = 3 \frac{\mu}{\rho_m g H} \quad (7)$$

де H – зміщення центру мас мікроорганізму щодо його центру плавучості.

$$\xi = (1 + \alpha_0) \partial u / \partial y - (1 - \alpha_0) \partial v / \partial y, \quad (8)$$

$$\alpha_0 = \frac{b_{\max}^2 - b_{\min}^2}{b_{\max}^2 + b_{\min}^2} \quad (9)$$

де b_{max} – велика напіввісь мікроорганізму, який має форму еліпсоїда, b_{min} – мала напіввісь.

Слідуючи моделі Лоренца [14] розглянемо задачу з вільними границями. У цьому випадку система рівнянь має бути проаналізована за наступних умов

$$\begin{aligned} \psi = \nabla^2 \psi = n = 0 & \quad \text{при} \quad y = 0, \\ \psi = \nabla^2 \psi = n = 0 & \quad y = h. \end{aligned} \quad (10)$$

II. Рівняння збурень

Оскільки розглядається двовимірна задача, то для аналізу зручно ввести функцію струму ψ наступним чином $u = \partial\psi / \partial y$, $v = -\partial\psi / \partial x$. Для того, щоб задовольнити граничні умови (10), виберемо наступне співвідношення для збурюючих функцій [14]

$$\psi = \sqrt{2} \frac{D(1+a^2)}{a} X(\text{Fo}) \sin\left(\frac{\pi ax}{h}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{h}\right) \quad (11)$$

$$n = \frac{N_0}{\pi r} \left[\sqrt{2} Y(\text{Fo}) \cos\left(\frac{\pi ax}{h}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{h}\right) - Z(\text{Fo}) \sin\left(\frac{2\pi y}{h}\right) \right] \quad (12)$$

де a характеризує періодичність руху по x , X – амплітуда конвективного руху, Y – різниця температур між висхідними і низхідними потоками, Z – відхилення вертикального профілю температури від лінійного.

Крім того, в рівняннях (11), (12) використовуємо нормоване число Релея

$$r = \text{Ra} / \text{Ra}_c, \quad \text{де} \quad \text{Ra} = gh^3 \nu \Delta \rho N_0 / (D\mu),$$

$$\text{Ra}_c = \pi^4 (1+a^2)^3 / a^2 - \text{числа Релея},$$

$$\text{Fo} = \pi^2 (1+a^2) Dt / h^2 - \text{число Фур'є}.$$

Підстановка рівнянь (11) і (12) до рівнянь (1) – (3) та використання методу Галеркіна дає

$$\frac{dX(\text{Fo})}{d\text{Fo}} = \text{Sc} [Y(\text{Fo}) - X(\text{Fo})], \quad (13)$$

$$\frac{dY(\text{Fo})}{d\text{Fo}} = AX(\text{Fo}) + X(\text{Fo})Z(\text{Fo}) - Y(\text{Fo}), \quad (14)$$

$$\frac{dZ(\text{Fo})}{d\text{Fo}} = -X(\text{Fo})Y(\text{Fo}) - bZ(\text{Fo}), \quad (15)$$

де $\text{Sc} = \mu / (\rho D)$ – число Шмідта.

$$A = \frac{B\pi^2 r W_c}{h} \frac{4 + 2(b-2)\alpha_0}{b}, \quad b = 4 / (1 + a^2). \quad (16)$$

Система (13) – (15) подібна до системи Лоренца [14]. Однак є відмінності в знаках у рівняннях (14) та (15).

III Аналіз нестійкості

Автономна система (13) – (15) має два стаціонарні стани. Перший стаціонарний стан

$$X(\text{Fo}) = Y(\text{Fo}) = Z(\text{Fo}) = 0. \quad (17)$$

При $A > 0$ характеристичне рівняння має три речові корені. При $A < 1$ усі власні значення негативні – стаціонарний стан стійкий. При $A > 1$ одне значення позитивно. Таким чином, $A_{crl} = 1$ – межа біоконвективної монотонної нестійкості. З виразу для A знаходимо рівняння нейтральної кривої стійкості у вигляді залежності числа Релея від параметра a :

$$\text{Ra}_1^* = \text{Ra} \frac{W_c B}{h} = \frac{4(1+a^2)\pi^2}{a^2 \left[4 + 2 \left(\frac{4}{1+a^2} - 2 \right) \alpha_0 \right]}, \quad (18)$$

Мінімум нейтральної кривої стійкості (18) знаходиться в положенні

$$a_{\min} = \sqrt{\frac{\sqrt{1+3\alpha_0^2} - 2\alpha_0}{1-\alpha_0}}. \quad (19)$$

Підстановка рівняння (19) у рівняння (18) дає критичний параметр монотонної нестабільності

$$\text{Ra}_{crl}^* = \frac{\pi^2 \left(\sqrt{1+3\alpha_0^2} + 1 - 3\alpha_0 \right)^3}{(1-\alpha_0)^2 \left(\sqrt{1+3\alpha_0^2} + 1 - \alpha_0 \right) \left(\sqrt{1+3\alpha_0^2} - 2\alpha_0 \right)}, \quad (20)$$

Значення Ra_{crl}^* зі зростанням α_0 зменшується – $\text{Ra}_{crl}^* = 4\pi^2$ при $\alpha_0 = 0$ та $\text{Ra}_{crl}^* = 27\pi^2/8$ при $\alpha_0 = 1$. Отже, сфероподібна форма мікроорганізмів сприяє стабілізації умов стійкості біоконвекції. Однак вплив форми мікроорганізмів на поріг стійкості біоконвекції невеликий і діапазоні $\alpha_0 = 0 \dots 1$ становить близько 15%.

Друга стаціонарна точка

$$X(\text{Fo}) = Y(\text{Fo}) = \pm \sqrt{b(A-1)}, \quad Z(\text{Fo}) = 1 - A. \quad (21)$$

При $A > 1$ один корінь характеристичного рівняння речовий і від'ємний, а два інших або речові та обидва того ж самого знака, або комплексно спряжені. При $A \geq A_{cr1} \sim 1$ речові частини другого та третього коренів від'ємні. Необхідна умова осцилюючої нестійкості - це комплексне сполучення другого і третього коренів при невід'ємній речовій частині. Границя цієї нестійкості є нульова речова частина. Це дає наступну умову осцилюючої нестійкості

$$A_{cr2} = \frac{Sc(Sc + b + 3)}{Sc - b - 1}. \quad (22)$$

Отже, за умови (22) з'являється субкритична біфуркація Хопфа, тобто у фазовому просторі виникає граничний цикл, що притягує орбіти.

Далі отримуємо вираз для числа Релея

$$Ra_{cr2}^* = \frac{Sc(Sc + b + 3)}{Sc - b - 1} \frac{4(1 + a^2)\pi^2}{a^2 \left[4 + 2 \left(\frac{4}{1 + a^2} - 2 \right) \alpha_0 \right]}. \quad (23)$$

Досліджуючи знайдену функцію на мінімум по a , знаходимо критерій осцилюючої нестійкості $Ra_{cr2}^* = Ra_{cr2}^*(Sc, \alpha_0)$.

Друге критичне значення Релея екстремальне (з мінімумом) залежить від числа Шмідта. Характер залежності Ra_{cr2}^* від α_0 від змінюється зі зростанням числа Шмідта. При низьких значеннях Sc ця залежність має зростаючий характер. З подальшим збільшенням Sc функція $Ra_{cr2}^* = Ra_{cr2}^*(\alpha_0)$ вже має максимум. Далі, зі зростанням значень чисел Шмідта ця функція набуває спадаючого характеру.

Далі виникає питання, що відбувається при подальшому збільшенні значення параметра A , тобто необхідно дослідити, що відбувається у фазовому просторі після виникнення граничного циклу. Для цього було проведено чисельне дослідження системи (13) – (15) з допомогою пакета “Mathematica”. Це дослідження показало, що при біоконвекції, як і термоконвекції, існують режими, що характеризуються виникненням дивного атрактора у фазовому просторі $(X(fo), Y(fo), Z(fo))$.

Табл. 1. Вплив числа Шмідта на критерій стійкості b_{cr3} і A_{cr3}

Sc	3	5	7	10	15	20
b_{cr3}	0.27	0.49	0.53	0.9	1.13	0.81
A_{cr3}	8.12	9.73	10.61	14	18	29.67

Виникнення дивного атрактора характеризується тим, що система починає описувати навколо одного з нестійких фокусів витки з амплітудою, що зростає у часі. Після кількох таких витків система раптово залишає цей режим і спрямовується до другого фокусу, починаючи описувати навколо нього витки по спіралі, що розкручуються. Потім, зробивши кілька витків, система перестрибує до першого фокусу і т.д. Проміжки часу, протягом яких система знаходиться в околиці кожного фокусу перш, ніж перестрибнути в околицю іншого, розподілені стохастичні, і в цьому процесі немає ніякої закономірності, хоча він породжений детерміністичною системою, що розгортається в часі. Число витків, що описуються системою навколо кожного з двох фокусів, є випадковим і тому цілком непередбачуваним.

Результати чисельного дослідження критерію виникнення дивного атрактора як функції числа Шмідта наведено у таблиці 1. Тут наведено середні значення параметрів b_{cr3} та A_{cr3} в діапазоні зміни m від 0.001 до 100. Видно, що зі зростанням числа Шмідта значення A_{cr3} збільшуються.

Однак, поведінку справжнього параметра стійкості (числа Релея) слід оцінювати за формулою

$$Ra_{cr3}^* = A_{cr3}(Sc) \frac{32\pi^2}{[4 - b_{cr3}(Sc)]b_{cr3}(Sc)[2 + 2[b_{cr3}(Sc) - 2]\alpha_0]}, \quad (24)$$

що впливає з виразу для A (16).

Параметр Ra_{cr3}^* являє собою критичне число Релея виникнення дивного атрактора. У відповідності з моделями [15,16] параметр Ra_{cr3}^* можна інтерпретувати як критерій виникнення незатухаючих турбулентних пульсацій, тобто критерій початку перехідного режиму руху.

Залежність Ra_{cr3}^* від α_0 при $Sc = idem$ носить монотонно зростаючий характер. Математично це обумовлено тим, що $b_{cr3} < 2$ і це, відповідно з (24), призводить до описаної зміни Ra_{cr3}^* . Залежність від числа Шмідта при $\alpha_0 = idem$ носить екстремальний характер на відміну залежності $A_{cr3} = A_{cr3}(Sc)$.

Висновки

На основі підходу Лоренца розглянуто нестійкість біоконвективної течії мікроорганізмів у плоско-

му двовимірному вертикальному шарі. В результаті рішення було отримано розрахункові дані для критичних параметрів нестійкості. Показано залежність критерію монотонної нестійкості Ra_{ck1}^* від параметра α_0 , що описує геометричну структуру мікроорганізму. Розрахунки показали, що сфероподібна форма мікроорганізмів сприяє стабілізації умов стійкості біоконвекції. Функція критерію осцилюючої нестійкості $Ra_{ck2}^* = Ra_{ck2}^*(Sc, \alpha_0)$ екстремальна та змінюється залежно від числа Шмідта. При малих значеннях числа Шмідта ця залежність має зростаючий характер. При подальшому зростанні значень Sc функція демонструє максимум. Крім того, зі збільшенням чисел Шмідта функція стає спадаючою. Функція критерію осцилюючої нестійкості $Ra_{ck2}^* = Ra_{ck2}^*(Sc, \alpha_0)$ залежить від числа Шмідта. При низьких значеннях числа Шмідта ця залежність має зростаючий характер. Далі, зі зростанням значень чисел Шмідта функція набуває спадаючого характеру.

Чисельне дослідження показало, що є режими, що характеризуються виникненням дивного атрактора у фазовому просторі. Отримано вираз для критичного числа Релея Ra_{ck3}^* , яке є критерієм виникнення дивного атрактора та виникненням незатухаючих турбулентних пульсацій. Аналіз досліджень показав, залежність Ra_{ck3}^* від α_0 при $Sc = idem$ носить монотонно зростаючий характер.

ЛІТЕРАТУРА

1. Asjad M.I, Rehman S, Ahmadian A, Salahshour S, Salimi M. First Solution of Fractional Bioconvection with Power Law Kernel for Vertical Surface. *Mathematics* 2021; 9: 1366; <https://doi.org/10.3390/math9121366>.
2. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A minimal hydrodynamic model for a traffic jam in an axon. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2009; 36(1): 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.09.004>
3. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A macroscopic model of traffic jams in axons. *Mathematical Biosciences* 2009; 218(2):142-52. DOI: 10.1016/j.mbs.2009.01.005
4. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Harmand S., Tyrinov A.I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2015; 91: 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2015.07.063>
5. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 2010; 20(1): 111–129. DOI: 10.1108/09615531011008154
6. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Effect of small particles on this stability of bioconvection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a layer of finite depth. *Int Commun Heat Mass*. 2004; 31: 1–10; doi: 10.1016/S0735-1933(03)00196-9.
7. Kuznetsov A.V. Nanofluid bioconvection in water-based suspensions containing nanoparticles and oxytactic microorganisms: oscillatory instability. *Nanoscale Research Letters* 2011; 6(1): 100; doi: 10.1186/1556-276X-6-100.
8. Kuznetsov A.V. Non-oscillatory and oscillatory nanofluid bio-thermal convection in a horizontal layer of finite depth. *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 2011; 30(2): 156–165; <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2010.10.007>.
9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media* 2007;11 (3); 241-246. DOI:10.1615/JPorMedia.v11.i3.20
10. Avramenko A.A., Kovetska Y.Y., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. Mixed convection in vertical flat and circular porous microchannels. *Transport in Porous Media* 2018; 124: 919-941. DOI:10.1007/s11242-018-1104-4
11. Becker S.M., Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Numerical modeling of a falling bioconvection plume in a porous medium. *Fluid Dynamics Research* 2004; 35 (5): 323-339. <https://doi.org/10.1016/j.fluidyn.2004.07.003>
12. Kuznetsov A.V. The onset of thermo-bioconvection in a shallow fluid saturated porous layer heated from below in a suspension of oxytactic microorganisms. *Eur. J. Mech. B.Fluids*. 2006; 25(2): 223–233; DOI 10.1016/j.euromechflu.2005.06.003
13. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The Onset of Convection in a Suspension of Gyrotactic Microorganisms in Superimposed Fluid and Porous Layers: Effect of Vertical Throughflow. *Transport in Porous Media* 2006; 65:159–176; DOI 10.1007/s11242-005-6086-3
14. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* 1963; 20: 130 – 141. DOI: 10.1007/978-0-387-21830-4_2
15. Hill N.A., Pedley T.J., Kessler J.O. Growth of bioconvection patterns in a suspension of gyrotactic micro-organisms in a layer of finite depth. *J. Fluid Mech.* 1989; 208: 509–543. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112089002922>
16. Ruelle D, Takens F. On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.* 1971; 20: 167–192.
17. Feigenbaum M.J. Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations. *J. Stat. Phys.* 1978; 19: 25- 52. <https://doi.org/10.1007/BF01020332>

CONVECTIVE INSTABILITY OF BIOFLUIDS UNDER THE ACTION OF MICROORGANISMS

A.A. Avramenko, Yu.Yu. Kovetska, O.I. Skitsko,
L.V. Oliinyk

*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy
of Sciences, Kiev 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.2>

The article presents the results of a study of the instability of the bioconvective flow of gyrotactic microorganisms in a flat vertical layer. When solving the problem, the Lorentz approach was used, which made it possible to determine boundaries of different flow regimes. The dependence of the criterion of monotonic stability Ra_{cr1}^* on the geometric structure of the microorganisms is analyzed. Calculations indicated that the spherical shape of microorganisms contributes to the stabilization of the conditions of bioconvection. The effect of the Schmitt number on the criterion of oscillating stability Ra_{cr2}^* is analyzed. It has been determined that for elliptical microorganisms at low Schmidt numbers ($Sc < 8$) the process of oscillatory instability stabilizes. A relation was obtained for the critical Rayleigh number Ra_{cr3}^* , which describes the conditions for the appearance of a strange attractor and undamped turbulent pulsations. The analysis showed that the dependence of Ra_{cr3}^* for the constant values of the Schmidt number has a monotonically increasing character.

References 17, tables 1.

Key words: Lorenz approach, strange attractor, gyrotactic microorganisms, criteria for the stability.

1. Asjad M.I, Rehman S, Ahmadian A, Salahshour S, Salimi M. First Solution of Fractional Bioconvection with Power for Vertical Surface. *Mathematics* 2021; 9: 1366; <https://doi.org/10.3390/math9121366>.

2. Kuznetsov A.V., Avramenko, A.A. A minimal hydrodynamic model for a traffic jam in an axon. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2009; 36(1): 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.09.004>

3. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A macroscopic model of traffic jams in axons. *Mathematical Biosciences* 2009; 218(2):142–52. DOI: 10.1016/j.mbs.2009.01.005

4. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Harmand S., Tyrinov A.I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2015; 91: 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.063>

5. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 2010; 20(1): 111–129. DOI: 10.1108/09615531011008154

6. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Effect of small particles on this stability of bioconvection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a layer of finite depth. *Int Commun Heat Mass*. 2004; 31: 1–10; doi: 10.1016/S0735-1933(03)00196-9.

7. Kuznetsov A.V. Nanofluid bioconvection in water-based suspensions containing nanoparticles and oxytactic microorganisms: oscillatory instability. *Nanoscale Research Letters* 2011; 6(1): 100; doi: 10.1186/1556-276X-6-100.

8. Kuznetsov A.V. Non-oscillatory and oscillatory nanofluid bio-thermal convection in a horizontal layer of finite depth. *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 2011; 30(2): 156–165; <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2010.10.007>.

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media* 2007; 11 (3); 241–246. DOI:10.1615/JPorMedia.v11.i3.20

10. Avramenko A.A., Kovetska Y.Y., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. Mixed convection in vertical flat and circular porous microchannels. *Transport in Porous Media* 2018; 124: 919–941. DOI:10.1007/s11242-018-1104-4

11. Becker S.M., Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Numerical modeling of a falling bioconvection plume in a porous medium. *Fluid Dynamics Research* 2004; 35 (5): 323–339. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.07.003>

12. Kuznetsov A.V. The onset of thermo-bioconvection in a shallow fluid saturated porous layer heated from below in a suspension of oxytactic microorganisms. *Eur. J. Mech. B/Fluids*. 2006; 25(2): 223–233; DOI 10.1016/j.euromechflu.2005.06.003

13. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The Onset of Convection in a Suspension of Gyrotactic Microorganisms in Superimposed Fluid and Porous Layers: Effect of Vertical Throughflow. *Transport in Porous Media* 2006; 65:159–176; DOI 10.1007/s11242-005-6086-3

14. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* 1963; 20: 130 – 141. DOI: 10.1007/978-0-387-21830-4_2

15. Hill N.A, Pedley T.J, Kessler J.O. Growth of bioconvection patterns in a suspension of gyrotactic micro-organisms in a layer of finite depth. *J. Fluid Mech.* 1989; 208: 509–543. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112089002922>

16. Ruelle D, Takens F. On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.* 1971; 20: 167–192.

17. Feigenbaum M.J. Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations. *J. Stat. Phys.* 1978; 19: 25–52. <https://doi.org/10.1007/BF01020332>

Отримано 02.02.2023
Received 02.02.2023

УДК: 536.24:533

ЕНЕРГОКЛІМАТИЧНА БЕЗПЕКА І ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВОГО СЕКТОРУ**Халатов А.А.**, академік НАН України, **Фіалко Н.М.**, член-кореспондент НАН України,
Тимченко М.П., канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна*<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.3>

Розглянуто питання енергокліматичної безпеки в контексті Зеленої угоди ЄС. Виконано аналіз важливих напрямів і технологій, спрямованих на досягнення енергокліматичної безпеки систем енергозабезпечення житлового сектору України. Розглянуто особливості формування поняття енергокліматичної безпеки в аспекті її пріоритетності щодо інституційних вимог до різних видів безпеки.

The issues of energy and climate security in the context of the EU Green Agreement are considered. An analysis of important directions of building stocks of Ukraine has been carried out. The features of the formation of the concept of energy and climate security in terms of its priority in relation to institutional requirements for different types of security are considered.

Бібл. 16, рис. 2.

Ключові слова: системи енергозабезпечення, житловий сектор, енергокліматична безпека, глобальне потепління, безкарбонова енергетика, енергоефективність. .

AR – Assessment Report (Оціночний звіт МГЕЗК);
 ARs – Assessment Reports (Оціночні звіти МГЕЗК);
 AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6 – (ARs 1-го÷6-го циклів впродовж 1988-2022 pp.);
 COP – conferences of parties (конференції країн-підписантів РКЗК ООН; вищий керівний орган РКЗК ООН);
 COP 1 – conference of parties No. 1 (організаційна зустріч, Берлін, 1995);
 COP 3 – conference of parties No. 3 (Київський протокол, Кіото, 1997);
 COP 21 – conference of parties No. 21 (Паризька кліматична угода, Париж, 2015);
 COP 27 – conference of parties No. 27 (Шарм-еш-Шейх, 2022);
 ENSO – El Niño-Southern Oscillation (Фаза Ель-Ніньйо Південного коливання);
 ENSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity (європейська мережа операторів системи передачі електроенергії);
 nZEB – nearly zero-emission building (будівля з майже нульовими викидами);
 SR15 – Special Report 15 (Спеціальна доповідь 15, МГЕЗК, 2018);
 SSP – Shared Socioeconomic Pathways (спільні соціально-економічні шляхи);

ZEB – будівля з нульовими викидами;
 ВВП – валовий внутрішній продукт;
 ВЕС – вітряна енергетична станція;
 ВССС – Воднева стратегія ЄС;
 ГЕП – глобальний енергетичний перехід;
 ГПК – глобальне потепління клімату;
 ГтС – Гігатон Карбону;
 ЕКБ – енергокліматична безпека;
 Е-паливо – електричне паливо (е-паливо);
 ЄЗУ – Європейська Зелена угода (Green Deal EU);
 ЄКЗ – Європейський кліматичний Закон;
 ЗЗЛГЕС – землекористування, зміна в землекористуванні та лісове господарство;
 КСЗ – кліматична система Землі;
 МГЕЗК – Міжнародна група експертів зі зміни клімату;
 ПГ – парниковий газ;
 ПЕР – первинні енергоресурси;
 ПрГ – природний газ;
 РДВ – рівень двоокису вуглецю;
 РКЗК ООН – Рамкова конвенція про зміну клімату Організації Об'єднаних Націй;
 СЕЗ – система енергозабезпечення;
 СЕС – сонячна енергетична станція;
 ТПВТ – традиційна паливна вуглецевмісна тріада (вугілля, нафтопродукти, ПрГ);
 ТПЕР – традиційні первинні ресурси.

Вступ

Енергопостачання в житловому секторі безпосередньо пов'язане з енергокліматичною безпекою. Це

визначається критичним значенням, яке набуває вплив поточної глобальної зміни клімату на розвиток світової енергетики.

Наявні дослідження свідчать про те, що поточні кліматичні зміни викликані, насамперед, надмірними викидами парникових газів від спалювання викопних палив, з якими пов'язана більшість усіх антропогенних викидів CO_2 . Вказане, зокрема, стосується систем енергопостачання житлового фонду України, де споживаються великі обсяги вуглецевмісних первинних енергоресурсів. З огляду на це актуальним є створення безкарбонової модифікації таких систем в аспекті забезпечення енергокліматичної безпеки. Значний інтерес у даному контексті становить аналіз особливостей поточної глобальної зміни клімату і основних положень концепції енергокліматичної безпеки.

Особливості глобальної зміни клімату

Глобальне потепління вимагає нових підходів до створення СЕЗ житлового фонду як найбільш енергоємного сегмента економіки країни. При цьому поточні зміни клімату набувають наразі критичного значення, що потребує адаптації цих систем до нових умов.

Найбільш повна, детальна і «консенсусна» інформація про особливості поточної глобальної зміни клімату міститься в Оціночних доповідях (Assessment Reports AR) Міжнародної групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК).

Поточна зміна клімату має, як відомо, дві головні особливості. По-перше, вона відбувається в режимі потепління, по-друге, є переважно антропогенним, а не природним явищем (рис. 1).

Потепління викликано «збагаченням» складу атмосфери парниковими газами (рис. 2). До переліку ПГ входять (у порядку спадання фізичного впливу на

парниковий ефект) CO_2 , CH_4 , NO_x , галогеновуглеводні (ХФВ) та інші гази. ПГ мають наступні кількісні оцінки радіаційного форсингу (інтенсивності впливу на парниковий ефект, Вт/м^2): CO_2 – 0,75-1,55; CH_4 – 0,49; O_3 – 0,3; NO_x – 0,15.

Серед ПГ навіть при їх низькій (слідовій $\leq 0,04\%$) концентрації, найвпливовішим фактором парникового ефекту є CO_2 . Він є стійким окисом і утворюється, головним чином, при спалюванні органічного (вуглецевмісного) викопного палива – вугілля, нафтопродуктів, природного газу тощо. Зростання концентрації двоокису вуглецю (КДВ) в атмосфері (рис. 2) відбувається високими темпами: у лютому 2022 р. рівень викидів CO_2 становив 419,2 ppm; у лютому 2021 – 416,1 ppm; у 2014 р. – 397,7 ppm; у 2000 – 370 ppm; у 1960 – 316,6 ppm; 1850 – 286 ± 3 ppm; 1750 – 277 ± 3 ppm. На рис. 2 а, б, в наведена динаміка зростання КДВ (крива Кілінга) з початку налагодження у 1957 році їх безперервних прецензійних вимірювань з похибкою порядку 0,1 %.

Розглянуті особливості зміни клімату спричиняють проблему кліматичної безпеки. Остання, як свідчать наведені дані, безпосередньо пов'язана зі станом світової енергетики та її безпековими характеристиками.

Енергокліматична безпека

Поняття «Безпека», виходячи з профільної і галузевої множинності сучасного світу, взаємопов'язаності, взаємозумовленості і різноманіття людської діяльності, має багатовимірну структуру і широкий спектр тлумачення і використання. Безпеку вивчає міжгалузева нау-

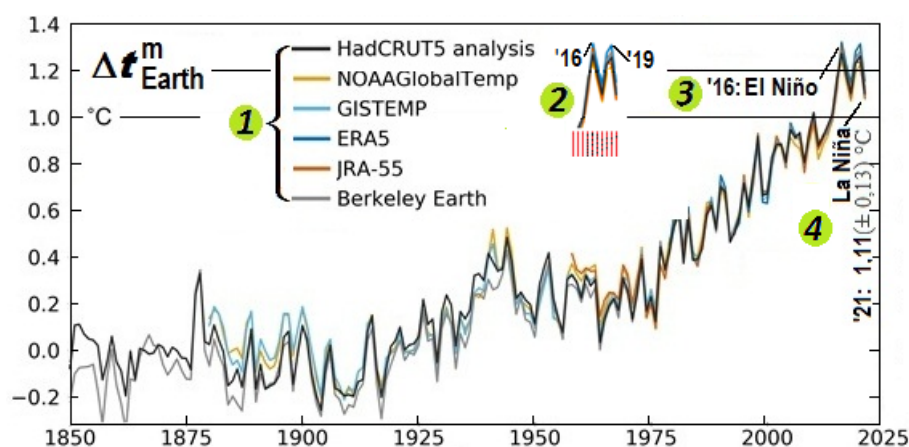


Рис. 1. Середня глобальна різниця температур 1850-1900 рр., Δt^m_{Earth} (°C): 1 – найкомпетентніші в світі центри збору та обробки кліматичних даних; 2 – дані у найспекотніші 7 років поспіль за останні півстоліття; 3 – амплітудна «модуляція» температурної кривої з Ель-Ніньо–південним коливанням (ENSO) за останні 7 років; 4 – початок (листопад 2021) етапу Ла-Нінья ENSO [1-4]

кова дисципліна «Безпекознавство» (Science of Security), або «Безпека життєдіяльності» [9]. В офіційних (у тому числі нормативно-правових актах) матеріалах та наукових публікаціях часто зустрічається дефініція «безпеки», яка заснована на узагальненому універсальному понятті «захищеності» (safety). Є визначення безпеки стосовно

населення і навколишнього середовища. Системоутворюючим чином «Безпека», як сап'єнтний тип безпеки, визначена у статті 2 Монреальської декларації від 15.05.2002 р. «Право людини на безпеку» [10]:

Безпека – це стан, в якому небезпека і умови, які ведуть до фізичного, психологічного або матеріального

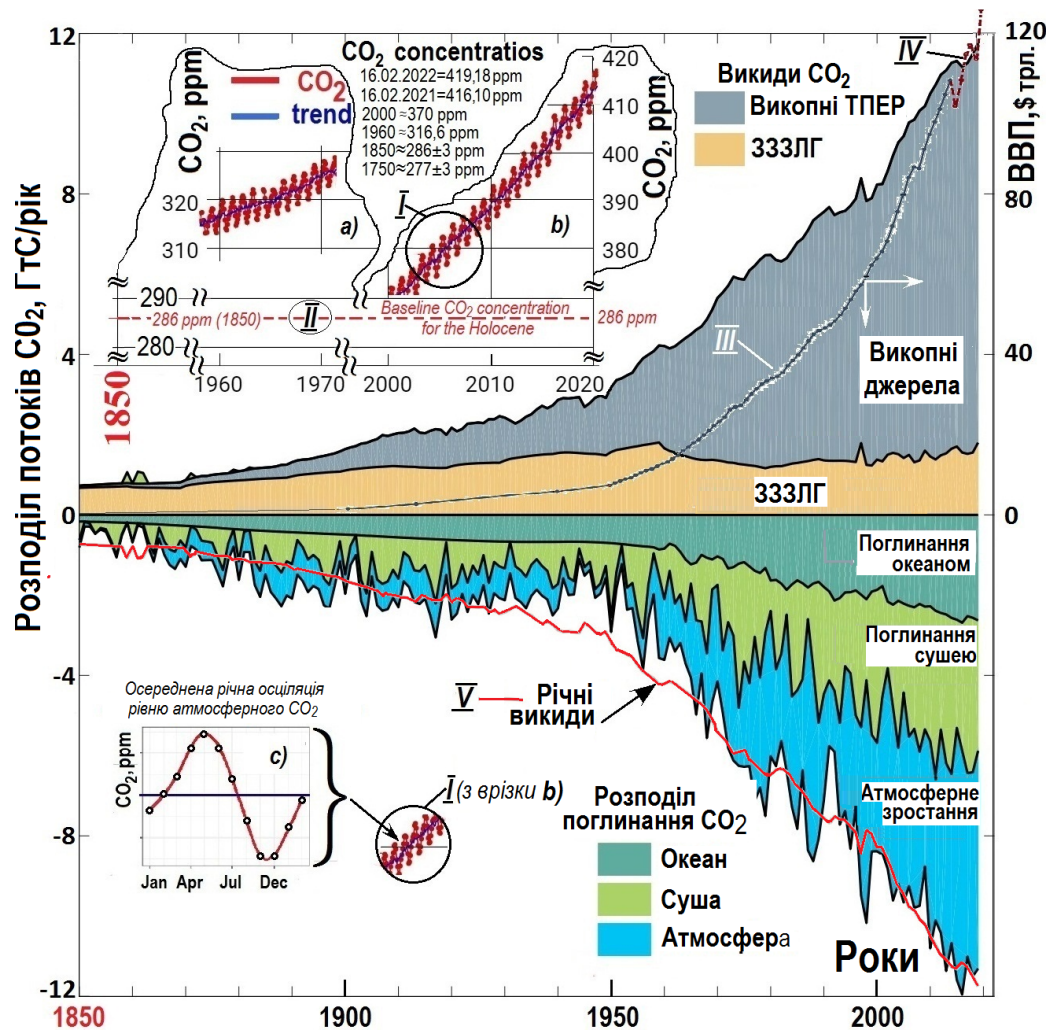


Рис. 2. Головні компоненти глобального вуглецевого циклу у вигляді часового ряду щорічних бюджетів {емісії [верхня половина графіка, позитивні значення]}/{поглинання [нижня половина графіка, негативні величини]} парникових газів в еквіваленті двоокису вуглецю (в одиницях ГтС) впродовж промислової ери (індустріального та початку постіндустріального періодів) розвитку світової економіки; врізки – фрагменти у рівновеликих масштабах кривої Кілінга: а) – період 1960-1970 рр.; б) – останні 20 років, с) – типова річна мінливість концентрації атмосферного діоксиду вуглецю (КДВ), яка зумовлена вегетативним циклом царства рослин. Виноски: I – виноска, що деталізує річну глобальну осциляцію КДВ; II – базовий рівень глобальної концентрації CO₂ в атмосфері в контрольний 1850 рік; зростання світового ВВП (права шкала): III - у 1850-2015 рр. (в цінах 2011 р. IV - у 2016-2021 рр. (поточні ціни приведені до цін 2011 р., V – загальні глобальні щорічні викиди CO₂ [1, 5-8]

збитку, контролюються для того, щоб зберегти здоров'я і добробут індивідів і суспільства. Безпека є результатом комплексного процесу, коли людина взаємодіє з навколишнім середовищем, включаючи фізичні, соціальні, культурні, технологічні, політичні, економічні і організаційні середовища. Безпека, проте, не визначається, як повна відсутність небезпеки.

У даній статті підтримується і використовується узагальнений науковий (теоретичний, точніше «логіко-детермінантний») підхід до розуміння поняття «безпеки» та його визначення, запропоноване В. Заплатинським [11]. Головною його відмінністю є те, що безпека розглядається відносно складної системи:

Безпека – це такі умови, в яких перебуває *складна система* (підкреслено авт.), коли дія зовнішніх і внутрішніх чинників не призводить до процесів, що вважаються негативними по відношенню до даної *складної системи* у відповідності до існуючих, на даному етапі, потреб, знань та уявлень.

Розгляд енергокліматичної безпеки (ЕКБ) має відбуватися на тлі як екологічної безпеки, так і економічної безпеки. Усі три (енергокліматичний, екологічний та економічний) види безпеки на перший погляд рівноважні. Але, виходячи з кліматологічних даних, у будівельній галузі, зокрема, у житловому секторі (ЖС), щодо формування інституціональних вимог до безпеки, енергокліматичному її аспекту слід надавати пріоритет. Природно, що основні принципи ЕКБ визначаються поняттям «кліматична система Землі», яка є одним з яскравих прикладів складної геофізичної та біогеохімічної системи.

Відповідно зі спеціальною доповіддю SR15 [12], КСЗ визначається як вельми складна еволюційна саморегульована система, що складається з п'яти основних взаємодіючих компонентів: атмосфери, гідросфери, кріосфери, літосфери та біосфери. На сталість теплової поведінки КСЗ впливають зовнішні фактори (зокрема, циклічні коливання сонячної радіації, виверження вулканів тощо), а в останні два століття ще і антропогенні зміни складу атмосфери та зміни у землекористуванні. Критичність викидів парникових газів (головним чином CO_2) антропогенного походження, які викликали глобальне потепління клімату, стала зрозумілою з 1970-х років. Прогнози щодо глобального потепління базуються на великій кількості кліматологічних досліджень. Результати їх фізичного вивчення і узагальнення представлені в звітах МГЕЗК AR1-AR6, SR15, а енергополітичні рішення закріплені у міжнародних угодах, зокрема РКЗК ООН, Кіотському

протоколі, Паризькій угоді, численних СОР з СОР 27 включно. Практично в кожній країні діє Національний план скорочення викидів ПГ. На сьогодні основним достовірним інструментом вивчення сценарію майбутнього розвитку ГПК є кліматичне моделювання. Розроблення і експлуатація кліматичних моделей зосереджені в десятку провідних центрів, які забезпечені достатнім для цієї роботи інтелектуальним потенціалом, досвідом, матеріальною базою (зокрема, суперкомп'ютерами). Прикладом продукції деяких цих центрів є узагальнені дані щодо динаміки наземної температури, які наведені на рис. 1. Вказана температура вважається одним із основних індикаторів ГПК.

В AR1- AR5 (1990-2015) представлені результати дослідження із застосуванням кліматичних моделей все більшої фізичної складності, в AR6 (2018-2022) – вже соціально-економічні сценарії щодо наслідків ГПК. До даних цих досліджень надається відносно відкритий доступ. Зокрема, вони використовуються вітчизняними кліматологами. Наприклад, на базі 10 регіональних кліматичних моделей Європейського проєкту ENSEMBLES були адаптовані кліматичні показники (температури, градусо-днів тощо) опалювального періоду на території України до середини ХХІ ст. [13].

Безкарбонові СЕЗ житлового фонду як засіб досягнення енергокліматичної безпеки

Енергетична політика ЄС у житловому секторі та енергокліматична безпека. Інституційною платформою сучасної Європейської енергетичної політики є **Європейська зелена угода (ЄЗУ)**. Ядром ЄЗУ вважається діючий з 2021 року Європейський кліматичний закон (ЕКЗ) у вигляді Регламенту (ЄС) 2021/1119. Він законодавчим чином закріплює генеральну мету ЄС – досягнути до 2050 року стратегічної цілі – кліматичної нейтральності. ЕКЗ разом з низкою наступних «зелених» регуляторних ініціатив та розпоряджень ЄС створює «Пакет 55» («Fit for 55»). Серед іншого він спрямований на досягнення оновленої, помітно більш амбітної, проміжної цілі ЕКЗ: скоротити чисті викиди парникових газів як мінімум на 55% до 2030 року у порівнянні з базовим рівнем у 1990 р. «Fit for 55» є органічною частиною європейського нормативного поля (*acquis communautaire*) ЄС, тобто сукупності спільних прав і зобов'язань, обов'язкових до виконання в усіх країнах-членах ЄС у цілому.

У відношеннях з Європейським Союзом, Україна має статус кандидата на членство ЄС. Згідно з цим Україна зобов'язана прагнути до імплементації *acquis communautaire*. Зокрема, дотримуватися якомога повної

імплементції екологічної та кліматичної політики Євросоюзу. Ця політика базується на висновках роботи МГЕЗК, викладених у звітах AR1-AR6, SR15 і має глибокий і системний характер. Крім того, еколого-кліматична політика ЄС наразі є законодавче врегульованою численними директивами та пакетами регуляторних актів ЄС.

Критичними факторами, які ускладнюють, а в деяких випадках унеможливають вирішення питання кліматичної безпеки (за умови виконання нормативних вимог щодо енергозабезпеченості домогосподарств) є обмеженість існуючих природних стоків (наземних або морських резервуарів) CO_2 , недостатні потужності секвестрації CO_2 безпосередньо з атмосфери або на місці його утворення, дострокове (тобто до часу повномасштабного розгортання потужностей безкарбонової енергетики) вичерпання родовищ викопних ПЕР, феномен зростання населення планети з темпом, випереджаючим можливості безкарбонової енергетики задовольнити його відповідні потреби.

Важливі напрями та технології щодо досягнення енергокліматичної безпеки СЕЗ житлового сектору. Більшість фізичних, соціально-економічних та організаційних положень енергокліматичної безпеки засновані на платформі глобального енергетичного переходу. Останній перебуває на порядку денному вже кілька десятиріч (з часів РКЗК ООН, Кіотського протоколу, Паризької угоди, численних COP з COP 27 включно). Однак особливої актуальності ГЕП набув останнім часом на тлі загострення загальносвітових енергетичних та екологічних загроз. Спільним знаменником цих загроз є критична вимога у короткі строки завершити енергетичний перехід. Дана вимога потребує повної декарбонізації до 2050 року енергозабезпечення всього житлового фонду. При цьому має відбутися відщеплення (decoupling) лінії зростання світової низьковуглецевої енергетики від траєкторії сталого розвитку. Основні положення сучасної енергетичної політики ЄС, шляхи і засоби обмеження та пом'якшення наслідків негативної зміни клімату викладені у пакеті «Fit for 55». Зокрема, згідно з оновленою директивою Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) [14] у країнах-членах ЄС усі нові будівлі з початку 2021 року, а будівлі громадського призначення – навіть з початку 2020 р., повинні відповідати вимозі майже нульового енергоспоживання. Нещодавно в ЄС розпочато процедуру приведення вказаної Директиви Directive 2010/31/EU у відповідність з Європейською зеленою угодою.

Остання передбачає повну декарбонізацію житлового фонду ЄС до 2050 року, тобто перехід від теперішнього стандарту будівель nZEB з майже нульовим енергоспоживанням до стандарту будівель з нульовим рівнем емісії (ZEB) [15].

Україна як кандидат на членство в ЄС також повинна виконувати свої кліматичні зобов'язання. Відповідна українська концепція зеленого енергетичного переходу та декарбонізації СЕЗ житлового сектору [16] у цілому має корелювати не тільки з енергокліматичним порядком денним ЄС, але і інших розвинутих регіонів, зокрема, в Південно-Східній Азії (особливо, в КНР), Північній Америці (головним чином, в США).

Згідно з вищевикладеним перспективи розвитку СЕЗ житлового сектору України пов'язані насамперед з застосуванням замість викопних ПЕР переважно відновлюваних джерел енергії. При цьому важливою є реалізація так званого, міжгалузевого сполучення (coupling) стратегії, яка передбачає інтегровану цілісність кількох різних систем: енергоспоживання/енергопостачання, електроенергетика/теплоенергетика, централізована/децентралізована генерація тощо.

Вказане інтегрування в межах СЕЗ житлового сектору централізованої і децентралізованої генерації, як наслідок, зумовлює потребу в акумулюванні різних видів енергії (механічної, теплової, електричної, хімічної, електрохімічної, термохімічної, кінетичної, потенційної тощо) та в деяких випадках в її «ітераційній», трансформації. З огляду на це виникає необхідність у формуванні окремого сегмента енергетичної галузі – високоефективних накопичувачів енергії.

Крім того перспективні СЕЗ житлового сектору пов'язані з застосуванням сучасних інформаційно-комутаційних технологій, за допомогою яких здійснюється управління взаємодією між окремими елементами системи, багаторівнева диспетчеризація тощо.

На особливу увагу заслуговують можливості застосування водню у СЕЗ житлового фонду України на тлі інших альтернативних палив. При цьому «зелений водень» має розглядатися як складний біфункціональний енергетичний продукт. Його першою функцією є функція мультиваріантного електричного палива (е-палива) замітника ТПВТ. Друга функція – це функція універсального накопичувача енергії у газоподібному або скрапленому стані (при криогенних температурах). Зауважимо стосовно більшості кольорових незелених видів водню («сірого», «блакитного», «бурого» та ін.) певна частина експертів вважає, що вони не повинні

використовуватися допоки не пройдуть певний еколого-енергетичний контроль. Згідно з п.п. 5, 6 «Ключових дій» та наступними відповідними заходами щодо реалізації цих дій у програмі «Водневої стратегії ЄС» запроваджуються «загальний поріг/стандарт з низьким рівнем викидів вуглецю для просування установок для виробництва водню на основі показників повного життєвого циклу парникових газів». Зараз запропоноване обмеження для низьковуглецевого водню вже включено до Директиви про внутрішній ринок водню.

Щодо систем теплопостачання житлового сектору, то низьковуглецевий шлях їх розвитку передбачає забезпечення високого ступеня «електрифікації» теплопостачання за умови інтеграції електричних і теплових мереж у багаторівневу систему енергопостачання, розширення масштабів джоулевого обігріву за рахунок «зеленої» електроенергії тощо.

При використанні води в системах теплопостачання як найбільш поширеного теплоносія мають застосовуватися переважно низькотемпературні системи опалення та оптимізоване кількісно-якісне керування режимами мереж з врахуванням раціонального рівня температури на зворотному кінці контуру циркуляції теплоносія.

Потребує також модернізації об'єктна основа систем теплопостачання України – наявний житловий фонд, що складається значною мірою з будівель масової забудови. Згідно з вказаною модернізацією житловий фонд має відповідати класу ефективності *B* і *A* із забезпеченням високого рівня комфортності, екологічності, цифровізації процесів енергоспоживання/енергопостачання.

Насамперед зазначимо, що зважаючи на наявність в Україні потужної ядерної енергетики, актуальною залишається проблема розвитку АЕС нового покоління. При цьому йдеться про доцільність розвитку екологічно вдосконалених технологій.

Висновки

Розглянуто поточні і прогнозні дані стосовно глобальної зміни клімату, які свідчать про актуальність проблеми кліматичної безпеки, що безпосередньо пов'язана зі станом енергетики, зокрема, з енергозабезпеченням житлового сектору та його безпековими характеристиками. Проаналізовано основні тренди щодо досягнення енергокліматичної безпеки систем енергозабезпечення житлового сектору України. При цьому акцентується увага на необхідності переходу до сучасних декарбонізованих централізованих і

децентралізованих систем енергопостачання, реалізації стратегії міжгалузевого сполучення, розвитку напряму накопичення різних видів енергії та її «ітераційної» трансформації, перспективності застосування низьковуглецевого відновлюваного водню тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Handbook of Transitions to Energy and Climate Security*. Edited by Robert E. Looney Routledge, Ltd. (2017). P. 526. <https://doi.org/10.4324/9781315723617>
2. *NASA Homepage*, <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>, last accessed 2022/04/22.
3. *WMO Homepage*, <https://news.un.org/en/story/2022/01/1110022>, last accessed 2023/02/17.
4. *NASA Homepage*, <https://www.nasa.gov/press-release/2021-tied-for-6th-warmest-year-in-continued-trend-nasa-analysis-shows>, last accessed 2022/04/22, last accessed 2022/04/22.
5. *World in data Homepage*, <https://ourworldindata.org/grapher/world-gdp-over-the-last-two-millennia?time=1.latest>, last accessed 2022/04/22.
6. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W. and al., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12. P. 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
7. *World in data Homepage*, Economic growth <https://ourworldindata.org/economic-growth>, last accessed 2022/04/22.
8. <https://www.statista.com/statistics/268750/global-gross-domestic-product-gdp/>
9. Clifton L Smith, David Jonathan Brooks. *Security Science: The Theory and Practice of Security*. Elsevier, Lnd (2013). <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06978-8>
10. *Montreal-Declaration*, 15.05.2002. Health and human rights. Vol. 6 No. 2.P.185-192. <https://cdn1.sph.harvard.edu/wp-content/uploads/sites/2469/2014/04/11-Montreal-Declaration.pdf>
11. Заплатинський В. Логіко-детермінантні підходи до розуміння поняття «безпека». Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Фізичне виховання, спорт і здоров'я людини. Випуск 5, 2012. С. 90-98. <https://doi.org/10.32626/2309-8082.2012-0.%p>
12. IPCC: *Global warming of 1.5 °C*. (2018). Retrieved from [ipcc.ch/report/sr15/](https://www.ipcc.ch/report/sr15/)

13. *Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., Shpytal, T. M.* Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskiy Zhurnal*. Vol. 41(6). 2019. P.144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>

14. *European Union*: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583922805643&uri=CELEX:02010L0031-20181224> <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

15. *European Green Deal*: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683, last accessed 2023/02/17.

16. <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-koncepciyi-zelenogo-energetichnogo-perchodu-ukrayini-do-2050-roku>

ENERGY AND CLIMATE SECURITY AND ENERGY SUPPLY OF THE BUILDING STOCKS

Khalatov A., Fialko N., Tymchenko M.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.3>

The issues of energy and climate security in the context of the EU Green Agreement are considered. An analysis of important areas and technologies aimed at achieving energy and climate security of energy supply systems in the building stocks of Ukraine has been carried out. It is noted, in particular, that among the relevant trends, the following deserve special attention: the transition to modern decarbonized centralized and decentralized energy supply systems, the implementation of a cross-industry communication strategy, the development of the direction of accumulation of various types of energy and its “iterative” transformation, the prospects for the use of low-carbon renewable hydrogen, etc. The features of the formation of the concept of energy and climate security in terms of its priority in relation to institutional requirements for different types of security are considered.

Key words: energy supply systems, building stocks, energy and climate security, global warming, carbon-free energy, energy efficiency.

References 16, figure 2.

1. *Handbook of Transitions to Energy and Climate Security*. Edited by Robert E. Looney Routledge, Lnd. (2017). P. 526. <https://doi.org/10.4324/9781315723617>
2. *NASA Homepage*, <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>, last accessed 2022/04/22.
3. *WMO Homepage*, <https://news.un.org/en/story/2022/01/1110022>, last accessed 2023/02/17.
4. *NASA Homepage*, <https://www.nasa.gov/press-release/2021-tied-for-6th-warmest-year-in-continued-trend-nasa-analysis-shows>, last accessed 2022/04/22, last accessed 2022/04/22.
5. *World in data Homepage*, <https://ourworldindata.org/grapher/world-gdp-over-the-last-two-millennia?time=1.latest>, last accessed 2022/04/22.
6. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W. and al., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12. P. 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
7. *World in data Homepage*, Economic growth <https://ourworldindata.org/economic-growth>, last accessed 2022/04/22.

8. <https://www.statista.com/statistics/268750/global-gross-domestic-product-gdp/>

9. Clifton L Smith, David Jonathan Brooks. *Security Science: The Theory and Practice of Security*. Elsevier, Lnd (2013). <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06978-8>

10. *Montreal-Declaration*, 15.05.2002. Health and human rights. Vol. 6 No. 2.P.185-192. <https://cdn1.sph.harvard.edu/wp-content/uploads/sites/2469/2014/04/11-Montreal-Declaration.pdf>

11. Zaplatinsky V. Logical-determinant approaches to understanding the concept of "security". *Bulletin of the Kamyanskyi National University named after Ivan Ohienko. Physical education, sports and human health*. Issue 5, 2012. P. 90-98. <https://doi.org/10.32626/2309-8082.2012-0.%p>

12. *IPCC: Global warming of 1.5 °C*. (2018). Retrieved from [ipcc.ch/report/sr15/](https://www.ipcc.ch/report/sr15/)

13. Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., Shpytal, T. M. Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskii Zhurnal*. Vol. 41(6). 2019. P.144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>

14. *European Union*: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583922805643&uri=CELEX:02010L0031-20181224> <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

15. *European Green Deal*: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683, last accessed 2023/02/17.

16. <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-koncepciyi-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku>

Отримано 17.02.2023

Received 17.02.2023

УДК: 662.61, 662.66, 532.528.

ЗАСТОСУВАННЯ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА ЯК ГІДРОДИНАМІЧНОГО КАВІТАЦІЙНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ГОТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Недбайло А.Є.¹, канд. техн. наук, Іваницький Г.К.^{1,2}, докт. техн. наук, Целень Б.Я.¹, канд. техн. наук, Радченко Н.Л.¹ канд. техн. наук, Гоженко Л.П.¹, канд. техн. наук, Щепкін В.І.¹

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.4>

Проведено огляд методів вироблення водо-вугільного палива (ВВП). Відзначено тенденцію виробництва водовугільних суспензій з використанням кавітаційних методів. Розглянуто існуючі типи кавітаційних пристроїв, які застосовуються для створення дрібно дисперсних ВВС, відзначено переваги та недоліки таких апаратів. Запропоновано принципово новий тип кавітаційного реактора для виготовлення ВВП – двомембранного гідродинамічного пульсаційного диспергатора, оснащеного соплом Вентурі, що дозволяє досягти високого рівня кавітаційних ефектів при обробці ВВС. Розглянуто методику проведення лабораторних досліджень по виготовленню ВВС на основі гідродинамічного пульсаційного апарата. В статті наведені результати експериментального дослідження властивостей ВВС в залежності від масової концентрації та часу обробки. Визначено вплив цих параметрів на якісні характеристики продукту, таких як розподіл вугільних дисперсій за розміром, динамічну в'язкість, стабільність, а також на величину рН.

An overview of the production methods of coal-water fuel (CWF) was carried out. The trend of production of water-coal suspensions using cavitation methods was noted. The existing types of cavitation devices, which are used for the creation of finely dispersed CWF, were considered, and the advantages and disadvantages of such devices were noted. A fundamentally new type of cavitation reactor for the production of CWF was proposed - a double-membrane hydrodynamic pulsation disperser equipped with a Venturi nozzle, that allows achieving the high level of cavitation effects during the processing of CWF. The article presents the results of an experimental study of the CWF properties depending on mass concentration and processing time. The influence of these parameters on the quality characteristics of the product, such as the size distribution of coal dispersions, dynamic viscosity, stability, and the pH value as well, was determined.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, пульсаційний диспергатор, водовугільне паливо, дисперсний аналіз, седиментаційна стійкість, в'язкість, рН.

d – діаметр частинок;

c_m – масова концентрація;

p – тиск;

v – швидкість течії суміші;

μ – динамічна в'язкість;

τ – час;

рН – показник активної кислотності;

ВВП – водовугільне паливо;

ВВС – водовугільна суспензія.

Вступ

Останніми роками у світі знову прокинувся інтерес до водовугільного палива, зумовлений насамперед зростанням цін на нафту, природний газ та інші енергоносії та підвищенням вимог щодо екології навколишнього простору. Україна багата на вугільні родовища, тому розвиток інфраструктури виробництва водо-вугільного палива на основі різних вугілля для використання в котельних установках теплоенергетики та житлово-комунального сектору замість природного газу є виключно важливою та нагальною державною проблемою [1,2].

Найбільш помітні успіхи у галузях технології ВВП на сьогодні спостерігаються у Китаї, Японії, Індії, – саме в країнах, бідних на природні вуглеводні, але які володіють помітними запасами вугільних середовищ. Технологія приготування ВВП у Китаї, так само як і розповсюджені у світі традиційні європейські технології, такі як "Reocarb" (Італія), "Fluidcarbon" (Швеція), "Densecoal" (Германия) та інші полягає у комбінації мокрого розмелу вугілля на різного типу млинах. Ці технології включають дві-три стадії подрібнення вугілля із застосуванням, в основному, барабанних вібраційних та кульових

млинів, що пов'язано з доволі великим енергетичними витратами. Гранулометричні склади ВВП, одержані за цими технологіями мають одну загальну властивість - бімодальність, яка суттєво підвищує їх седиментаційну стабільність, і концентрацію за рахунок максимального упакування твердої фази. Попри певні успіхи, існуючі технології ВВП не можна назвати завершеними. Залишається невирішеним ціла низка питань, насамперед, стосовно методів приготування та спалювання ВУТ. Незважаючи на значну кількість публікацій щодо характеристик горіння ВВП, питання про спосіб приготування паливної композиції залишається відкритим.

Сучасний стан розвитку технологій готування і спалювання ВВП та критичний аналіз існуючих публікацій по цій тематиці представлені оглядових статтях.[2-4]

Водовугільне паливо містить 60...70% тонкоподрібненого вугілля розміром 45...250 мкм, 30...40% води та 1% хімічного реагенту (пластифікатора, ПАР) для підвищення стабільності та реакційної здатності системи. Температура горіння ВВП становить 950... 1050°C, а ступінь вигорання палива - до 99,5%. Такі сприятливі умови сприяють зниженню в продуктах згорання оксидів азоту та окису вуглецю в 2 рази [2]. ВВП може вироблятися з антрацитів, кам'яного та бурого вугілля різних марок і зольності та води будь-якої якості, включаючи промислові води. Однією з найважливіших характеристик палива з точки зору його зберігання, транспортування та спалювання є його дисперсність, динамічна стабільність та реологічні властивості [1-8].

Якщо ВВС використовується для спалення вона має містити не менше ніж 60% вугілля по масі. Однак для застосування в гідротранспорті припустимі нижчі [1,5].

Розмір частинок ВВС відіграє важливу роль у реологічних характеристиках кінцевого продукту. При гідротранспорті суспензії максимально допустимий розмір частинок становить ~300 мкм. При зменшенні розміру нижче 300 мкм спостерігається зниження динамічної в'язкості суспензії. Але занадто дрібний розмір частинок (<50 мкм) призводить до суттєвого збільшення динамічної в'язкості. Тому для конкретного типу вугілля розподіл частинок за розміром (приміром, для бімодальної ВВС)) оптимізується за критерієм найменшої можливої динамічної в'язкості суспензії [5,7]. В'язкість, що впливає на плинність ВУВ, в першу чергу залежить від властивостей вугілля і існує тонкий баланс між в'язкістю, плинністю і швидкістю осідання частинок [7].

Дослідження в'язкості ВВП ускладнюються тим, що незалежно від грануляційного складу подрібненого вугілля суспензія при течії в трупрово-

дах проявляє себе як неньютонівська псевдо пластична рідина. Ступінь псевдопластичності зростає зі збільшенням вмісту вугілля та зменшенням середнього розміру частинок. Для прогнозування реологічних параметрів неньютонівських суспензій, широкого гранулометричного складу необхідно провести детальні віскозиметричні випробування [1,5,7]. Взагалі вимоги до концентрації, дисперсного складу реологічних властивостей ВВС сильно різняться в залежності від того, чи передбачається її транспортування або тривале зберігання, чи ВВП готується безпосередньо перед спалюванням [1,10].

За фізико-хімічною природою ВУС – це не механічна суміш вугілля з водою, а колоїдно-дисперсна система, в якій по суті немає вихідного вугілля та немає баластових компонентів. Елементний склад палива ВУС включає як органічні, і неорганічні (мінеральні) елементи, кожен із яких грає певну роль формуванні його фізико-механічних і теплотехнічних властивостей. [1,4,6].

В останні роки спостерігається тенденція до застосування кавітаційних методів при виробництві дрібнодисперсних ВВС на вторинній стадії мокрого розмелу замість традиційного механічного диспергування за допомогою шарових чи вібраційних млинів. Це пов'язано з можливістю зменшення енергетичних витрат, а також спрямованого впливу на якість кінцевого продукту.

Кавітаційна обробка сприяє деструкції молекул вугілля, що розпадається на окремі органічні складові з активною поверхнею частинок та високою кількістю вільних органічних радикалів частинок розміром 5...10 мкм. В результаті кавітаційного впливу вода також зазнає змін - у ній утворюються атомарний водень, перекис водню H_2O_2 тощо [8]. Гідродинамічна кавітаційна обробка на стадії підготовки ВВП не лише механічно руйнує вугілля, а й змінює хімічний склад поверхневих шарів вугільних частинок за рахунок реакції окислення-гідролізу у воді. Це спричиняє зниження в'язкості та підвищення стабільності готової паливної суспензії, призводить до зміни динаміки горіння ВВП та додаткового зниження викиди NO_x в 1,6 разів, а CO_2 в 1,3 рази. Кавітаційний спосіб отримання ВУТ покращує реологічні та седиментаційні властивості цільового палива, знижує шкідливі викиди при горінні, впливає на параметри горіння [9]. Застосування гідродинамічного генератора для мокрого розмелу вугілля дозволяє підвищити дисперсність і забезпечити гомогенність ВВС, збільшити їх хімічну активність, що в результаті дало можливість отримати високо-реактивні ВВП із концентрацією вугілля близько 60–70% [10].

В якості кавітаційного реактора для диспергування часток суспензії при мокрому розмелу застосовувався кавітаційний роторно-імпульсний апарат (PIA-200) [8], роторний гідродинамічний генератор кавітації [9]. В роботі [10] використовувався гідродинамічний кавітаційний міксер, який працював у режимі суперкавітації з високою кутовою швидкістю (10000 об/хв).

Не зважаючи на високу ефективність такого типу роторних апаратів в операціях гомогенізації їм притаманні певні недоліки. По перше, обробка високов'язких суспензій супроводжується великою витратою енергії, нагріванням, високим абразивним зносом рухомих поверхонь, що значно скорочує термін експлуатації цих пристроїв [8]. По друге, через сильну механічну дію відбувається неконтрольоване надмірно роздрібнення частинок суспензії [8,9],

На основі аналізу існуючих кавітаційних технологій створення ВВС нами запропоновано принципово новий кавітаційний реактор для проведення операції мокро-го розмелу на другій стадії готування тонко дисперсних ВВС, в якому в певній мірі відсутні зазначені вище негативні фактори, властиві роторно-імпульсним апаратам, які застосовуються зараз в цих технологіях.

Принцип роботи кавітаційного реактора для виготовлення водо-вугільних суспензій.

В ІТТФ НАНУ на протязі років розробляються ефективні пульсаційні апарати з активною мембраною різної модифікації, які використовуються у різних галузях виробництва в якості змішувачів, гомогенізаторів та екстракторів [11]. Апарати цього типу відрізняються високою зносостійкістю, що дозволяє обробляти грубодисперсні рідинні суміші з твердими частинками,

незалежно від їх форми, розміру та абразивних властивостей. [11,12]. Останнім часом модифікація цих апаратів спрямована на ініціювання в них кавітаційних явищ для підвищення ступеня диспергування та прискорення внутрішніх процесів. В рамках цього напрямку за участю авторів створено принципово новий тип кавітаційний пульсаційний апарат, в якому завдяки незначній, на перший погляд, зміні в конструкції ініціюється більш широкий комплекс кавітаційних механізмів, що дозволяє обробляти сировину із широким спектром структурно механічних і реологічних характеристик при порівняно невеликих питомих витратах енергії [13]. Новизна конструкції у порівняннях з традиційними пульсаційними апаратами полягає в тому, що в каналі рідинного тракту вміщено сопло Вентурі заданої геометрії.

На рис. 1 наведено принципову схему та загальний вигляд 2-мембранного кавітаційного пульсаційного диспергатора з соплом Вентурі. Апарат складається із завантажувальної ємності 7 з ВВС, яка знаходиться під атмосферним тиском; робочої камери з еліптичними боковими поверхнями 4; прямої труби 5, що з'єднує камеру 4 з ємністю 7. На ділянці труби 5 вміщено профільоване сопло Вентурі 6. Всередині камери 4 розміщено дві круглі гнучкі мембрани, які розділяють рідинний та газовий тракати апарата. За допомогою швидкодіючого е/м клапана 3 камера 4 у відповідності до заданої програми періодично з'єднується з ресивером низького тиску (РНТ) 1, або з ресивером високого тиску (РВТ) 2. Величина тиску в РВТ підтримується компресором, а величина тиску в РНТ – вакуумним насосом. Принцип роботи апарата полягає в наступному.

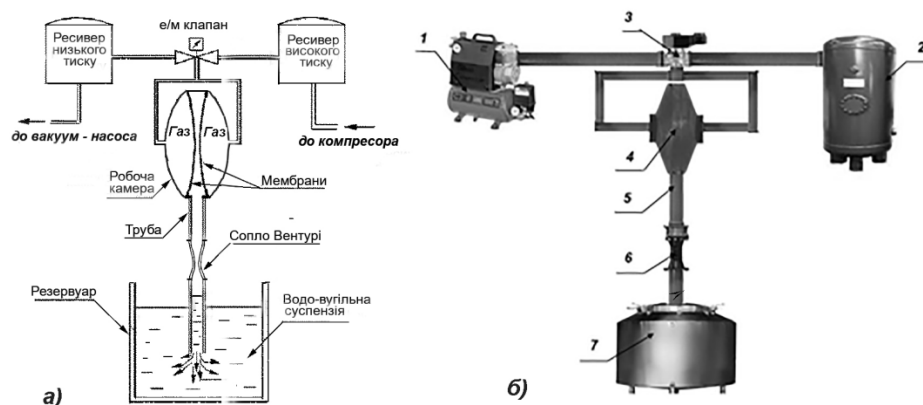


Рис. 1. Принципова схема (а) та загальний вигляд (б) кавітаційного пульсаційного диспергатора:

1 – ресивер низького тиску; 2 – ресивер високого тиску; 3 – електромагнітний клапан; 4 – робоча камера з мембранами; 5 – труба; 6 – сопло Вентурі; 7 – завантажувальна ємність з суспензією

В ємність 7 завантажують у заданому співвідношенні суміш попередньо роздрібненого вугілля з водою. На початку роботи рідина суміш через трубу 5 заповнює увесь об'єм камери 4, так що мембрани перекривають отвори, що з'єднують камеру з ресиверами. При з'єднанні камери з РВТ суміш під дією мембран виштовхується з камери 4 в ємність 7 через трубу 5 з соплом 6. Внаслідок швидкого інерційного руху вниз по трубі 5 рідина відривається від поверхні мембран із створенням глибокого вакууму над поверхнею стовпа рідини. Різка зміна тиску в об'ємі суміші в трубі прискорює масоперенос екстрагента всередині капілярної структури частинок сировини з можливим руйнуванням дисперсної фази і вилученням компонентів з клітин сировини. В ємності 7 під дією потужного струменя з труби відбувається інтенсивне турбулентне перемішування. Завдяки різниці тиску рідина в трубі швидко гальмується, змінює напрямок руху та зворотній, входить в камеру і притискається до поверхні мембран. На цій стадії камера 4 через клапан підключається до РНТ і мембрани швидко розходяться, перекриваючи отвори до ресиверів. При цьому відбувається різке гальмування потоку на бокових еліптичних поверхнях камери завдяки чому створюються потужні ефекти гідроудару всередині камери і в трубі [11,12]. На цій стадії камера знову підключається до РВТ, на чому завершується черговий цикл роботи пульсатора. За період одного циклу в рідинному тракті апарата ініціюється сукупність потужних механізмів, таких як кавітаційні ефекти всередині сопла, гідравлічний удар, дія зсувних напружень та інтенсивна турбулізація суміші.

Дана робота проведена з метою експериментальної перевірки та обґрунтування принципової можливості застосування кавітаційного пульсаційного диспергатора для готування тонко дисперсних водо-вугільних суспензій. В задачу дослідження не входило визначення оптимальних режимів створення ВВС по критеріям дисперсності, в'язкості та седиментаційної стабільності без застосування будь-яких хімічних реагентів - пластифікаторів.

Методика проведення експериментів

В експерименті використовували буре вугілля марки Б2 та водопровідна вода водопровідну воду. Методика отримання ВВС включає наступні операції: демінералізація вугілля за стандартною методикою та двостадійне подрібнення вугілля. Перша стадія – сухе подрібнення вугілля на кульовому млині до розміру частинок $d = 0...4$ мм із застосуванням сепаратора. Далі з попередньо роздрібненого вугілля готували водо-

вугільну суспензію із заданою масовою концентрацією c_m – вугілля/вода. В експерименті застосовувалися суспензії з концентраціями $c_m = 56, 60$ та 65% .

Друга стадія полягала у подальшому мокрому подрібненні частинок вугілля в кавітаційному пульсаційному диспергаторі до розмірів $d \leq 40$ мкм. Для цього попередньо приготовлену грубо дисперсну ВВС заливали в кількості 15 л в загрузочну ємність 7 апарата (рис.1) і проводили обробку суміші при температурі рідини 25°C . На першому етапі дослідження задача полягала у досягненні заданого ступеня дисперсності ($d \leq 40$ мкм) за можливо короткий час.

При обробці зразка суспензії заданої концентрації c_m початкова стадія полягала у виборі оптимального режиму – величини тиску в РВТ (в інтервалі $p_{\text{РВТ}} = 0,3 \div 0,5$ МПа) і, відповідно, тривалості одного циклу роботи апарата (в інтервалі $\Delta\tau_{\text{ц}} = 0,8 \div 1,2$ с). З урахуванням того, що $\Delta\tau_{\text{ц}} = \Delta\tau_{\text{РВТ}} + \Delta\tau_{\text{РНВ}}$, для кожного визначеного значення $\Delta\tau_{\text{ц}}$ необхідно також визначити оптимальні значення часу підключення камери до РВТ ($\Delta\tau_{\text{РВТ}}$) та до РНТ ($\Delta\tau_{\text{РНВ}}$). В процесі обробки величина тиску в РНТ підтримувалася на рівні $p_{\text{РНВ}} \propto 2$ кПа. Відбір проб суспензії безпосередньо з ємності пульсатора здійснювали через 10, 20 та 30 хвилин після початку обробки.

Дисперсійний аналіз ВВС проводили методами мікроскопічного аналізу на світловому мікроскопі Carl Zeiss Axio Imager Z1m. Обробку даних виконували за стандартною методикою.

Динамічна та умовна в'язкості одержаної ВВС визначалися, відповідно, за допомогою ротаційного віскозиметра ВСН-3 та віскозиметра ВЗ-246. Оскільки в задачу дослідження не входило визначення властивостей ВВС як неньютонівської рідини вимірювання динамічної в'язкості на віскозиметрі проводилися при стандартній кутовій швидкості обертання гільзи -200 об/хв.

Показник рН отриманих зразків тонко дисперсної ВВС контролювали за допомогою рН-метра Hanna Instruments HI 8424 N.

Результати дослідження

Експериментальні дослідження показують, що дисперсний склад суміші змінюється з часом обробки. Криві розподілу за розмірами вугільних частинок в зразках ВВС зображено на рис. 2.

Так, обробка в кавітаційному диспергаторі протягом 30 хв дозволяє отримувати фракційний склад палива, що відповідає вимогам використання як для ТЕС так і для котельних [1,2]. Обробка протягом 20 хв вже дозволяє

досягти необхідних показників для ТЕС. Тобто, в залежності від вимог до дисперсного складу суспензії можна використовувати різну тривалість обробки.

Результати вимірювання рН водо-вугільної суспензії з концентрацією $c_m = 56\%$ в залежності від часу обробки представлено на рис. 3.

Найбільш інтенсивне збільшення рН - на 2,3 одиниці спостерігалось після 10 хв обробки і склало приблизно. Подальша обробка також веде до підвищення рН, однак воно було менш вираженим і склало приблизно 0,5 одиниці наступні 20хв. та 30 хв. обробки. Підвищення рН середовища в умовах кавітаційної обробки спостерігалось іншими дослідниками [4,5,7], які пояснюють це утворенням вільних іонів та радикалів. В цьому діапазоні рН відбувається виділення гумінових кислот. Такі сполуки володіють вираженими поверхнево активними властивостями і забезпечують стійкість суспензії проти розшарування в часі отриманих ВВС. Тому використання кавітаційної стадії обробки може

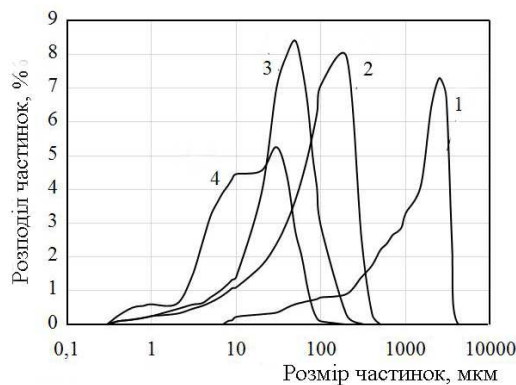


Рис. 2. Диференційні криві розподілу за розмірами вугільних частинок ВВС в залежності від часу обробки: 1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки

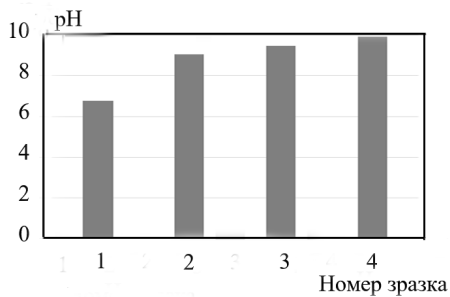


Рис. 3. Змінення величини рН в залежності від часу кавітаційної обробки: 1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки

суттєво мінімізувати або повністю скоротити об'єм використання поверхнево активних домішок.

Седиментаційну стійкість зразків ВВС різної концентрації c_m , одержаних після 30 хв обробки, визначали по висоті шару осадження дисперсної твердої фази і зміні технологічних характеристик з плином часу. Отримані залежності, представлені на рис.4, показують стабільність ВВС протягом 5-6 діб. Зниження висоти шару дисперсної фази свідчить про дестабілізацію дисперсної системи, що приводить до поступового осадження і згущення вугільних частинок. При підвищенні масової концентрації дисперсної фази з 55 до 65%, умовна в'язкість і міцність дисперсної системи зростає внаслідок збільшення числа контактів між частинками в одиниці об'єму.

Для кожної проби ВВС з концентраціями $c_m = 56\%$, 60% та 65% при різних термінах обробки визначалися динамічна та умовна в'язкості. На рис. 5 показано залежність динамічної в'язкості ВВС від масової

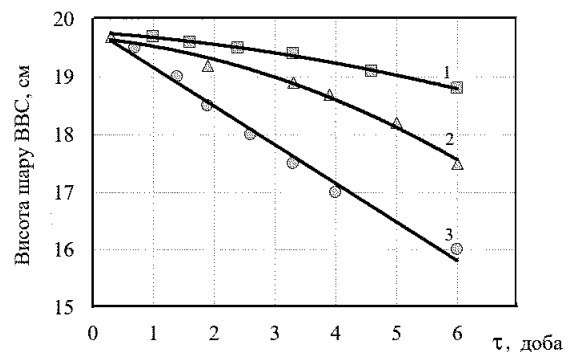


Рис. 4. Зміна з часом висоти шару дисперсної фази ВВС в процесі седиментації при різних концентраціях суспензії c_m : 1 – 56%; 2 – 60; 3 – 65%

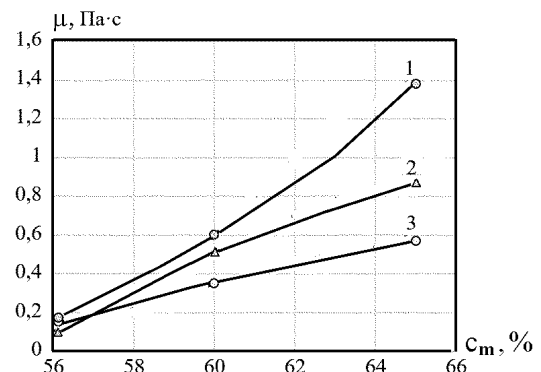


Рис. 5. Залежність динамічної в'язкості від масової концентрації дисперсної фази: 1 – після 30 хв обробки; 2 – після 20 хв обробки; 3 – після 10 хв обробки

концентрації вугілля. З аналізу графічних кривих можна дійти висновку, що з ростом дисперсності твердої фази в'язкість суспензії різко зростає з підвищенням концентрації суспензії і зменшується з часом кавітаційної обробки, що відповідає даним інших дослідників.

Так, найбільша динамічна в'язкість спостерігається в зразку з концентрацією 65% після 30-ти хвилинної обробки і досягла 1,38 Па•с. Згідно рекомендаціям, в'язкість ВВС має знаходитись в межах до 1 Па•с [1,2]. Отже параметрам в'язкості задовільняють всі отримані зразки, окрім тих, що пройшли 30-ти хвилинну обробку з масовою концентрацією більше 62%.

Висновки

Запропонована в даній роботі кавітаційна гідродинамічна технологія створення дрібнодисперсної водовугільної суспензії дозволяє суттєво інтенсифікувати процес виробництва ВВС, знизити енергозатрати на виробництво та забезпечити якість продукту, що відповідає вимогам теплоенергетичних підприємств. Попри те, що дана технологія знаходиться на початковому етапі розробки, лабораторні дослідження показали її перспективність. Використовуючи механізми гідродинамічної кавітації, можливо отримати достатньо рівномірний розподіл частинок вугілля за розмірами, що відповідає нормативним вимогам підприємств теплоенергетики, впливати на реологічні та структурно-механічні властивості суспензії. Також, особливе місце займає вплив кавітації на дисперсійне середовище, що може суттєво або зовсім скоротити необхідність додавання поверхнево-активних домішок до суспензії, та обумовлює якість і собівартість продукту. Такий ефект в комплексі з отриманням необхідної дисперсності частинок забезпечують седиментаційну стійкість ВВС, яка зберігається протягом 5-6 діб без застосування хімічних домішок. Підтримання седиментаційної стійкості суспензії протягом більш тривалого часу можливе також з застосуванням хімічних домішок або періодичною коротко тривалою рециркуляцією ВВС з інтервалом 2-3 доби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Круть А.А. Совершенствование технологии приготовления водоугольных суспензий (ВУС). Прикладная гидромеханика. 2014. №2. С. 36–47
2. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе. Промышленная теплотехника. 2007. № 5. С. 70–79.

3. Chang S., Zhuo J., Meng S., Qin S., Yao Q. Clean. Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives. Engineering 2016. 2. P. 447–459.
4. Leonel J.R. Nunes. Potential of Coal–Water Slurries as an Alternative Fuel Source during the Transition Period for the Decarbonization of Energy Production: A Review. Appl. Sci. 2020, 10, 2470; DOI:10.3390/app10072470
5. Singh H.; Kumar S.; Mohapatra S. K.; Prasad S. B.; Singh J. Slurryability and Flowability of Coal Water Slurry: Effect of Particle Size Distribution. J. Cleaner Prod. 2021, 323, 129183. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129183.
6. Ибрагимов, Н. И., Мукольянц А. А., Эргашева Д. К., Бабаев М. Ш. Изучение и разработка технологии получения водоугольной суспензии на основе отходов Ангренского угольного разреза. Молодой учёный. 2017. 8(142). С.103-109. DOI: <https://moluch.ru/archive/142/40004/>
7. Atesok G., Boylu F., Sirkeci A.A., Dince H. The effect of coal properties on the viscosity of coal+water slurries. Fuel, 2002. 81(14). P. 1855-1858. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00107-2
8. Морозов А.Г., Коренюгина Н.В. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива. Новости теплоснабжения. 2010. №7. С. 18–21
9. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of Hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study. ACS Omega 2022, 7 (42). 37369–37378. DOI: 10.1021/acsomega.2c03979
10. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., А.А. Дектерев А.А., Кузнецов В.А. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах //Горение и плазмохимия 19 (2021) 265-277. DOI: 10.18321/cpc464
11. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев.: Наукова думка, 2001. 345 с. ISBN 966-00-0815-5
12. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. Промышленная теплотехника.–2003. №1. С.29–34.
13. Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П., Иваницкий Г.К.. Кавітаційний реактор пульсаційного типу для інтенсифікації процесів екстрагування Міжнародна науково-практичної on-line конференція “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві” (11-12 листопада 2020 р.). – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 201–202. Режим доступу: <http://www.kntu.kr.ua/?view=science&id=6>

APPLICATION OF A PULSATING DISPERSOR AS A HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTOR FOR PREPARATION OF COAL WATER FUEL

Nedbailo A.E.¹, Ivanytsky G.K.^{1,2}, Tselen B. Ya.¹, Radchenko N.L.¹, Gozhenko L.P.¹, Shchepkin V.I.¹¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, vul. Marii Kapnist, 2a, Kyiv 03057, Ukraine*²*National technical University of Ukraine "National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 03056, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine*<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.4>

A brief review of modern technologies for the production and use of coal-water fuel (CWF) is carried out. The trend of creating innovative technologies for the production of coal-water suspensions using hydrodynamic cavitation methods was noted. Varieties of rotary-type cavitation reactors, which are used for wet grinding of coal and the creation of finely dispersed CWF, were considered, and the advantages and disadvantages of such devices were noted. On the basis of the conducted analysis, a new type of cavitation reactor for the production of CWF, created with the participation of the authors, is proposed. It is a double-membrane hydrodynamic pulsation disperser, equipped with a Venturi nozzle, which allows achieving the high level of cavitation effects in the treatment of coal-water suspensions. The method of conducting laboratory studies on the production of CWF on the basis of the hydrodynamic pulsation apparatus and the applied measuring devices are considered. The article presents the results of an experimental study of the obtained water-coal suspensions properties, which depend on the mass concentration and processing time. The influence of these parameters on the quality characteristics of the product, such as the size distribution of coal dispersions, dynamic viscosity, stability, and also on the pH value, was determined. The CWF rheological and stable properties have been found to depend on the concentration of the suspension and the processing duration. The results of the research can be used for the practical implementation of technologies for the production of hydrocarbon fuels for further use in thermal power plants.

References 15, figure 5.

Key words: hydrodynamic cavitation, coal-water fuel, cavitation, pulsating disperser, dispersion analysis, sedimentation stability, viscous, pH.

1. Krut' A.A. Refined technology of preparation of water-coal suspension. [Applied hydromechanics]. 2014. N2. P. 36-47. ([Rus.])

2. Dolinsky A.A., Khalatov A.A. Outlook of the coal-water fuel application in the thermal engineering and municipal-housing heating services. [Industrial heat engineering]. 2007. № 5. P. 70–79. (Rus.)

3. Chang S., Zhuo J., Meng S., Qin S., Yao Q. Clean. Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives. Engineering 2016. 2. P. 447–459.

4. Leonel J.R. Nunes. Potential of Coal–Water Slurries as an Alternative Fuel Source during the Transition Period for the Decarbonization of Energy Production: A Review. Appl. Sci. 2020, 10, 2470; DOI:10.3390/app10072470

5. Singh H.; Kumar S.; Mohapatra S. K.; Prasad S. B.; Singh J. Slurryability and flowability of coal-water slurry: Effect of particle size distribution. J. Cleaner Prod. 2021, 323, 129183. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129183.

6. Ibragimov, N. I., Mukolyants A. A., Ergasheva D. K., Babaev M. Sh. Study and development of technology for obtaining water-coal suspension based on waste from the Angren coal mine. [Young scientist]. 2017. 8(142). C.103-109. DOI: <https://moluch.ru/archive/142/40004/> (Rus.)

7. Atesok G., Boylu F., Sirkeci A.A., Dince H. The effect of coal properties on the viscosity of coal+water slurries. Fuel, 2002. 81(14). P. 1855-1858. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00107-2

8. Morozov A.G., Korenyugina N.V. Hydro-impact technologies for the production of water-coal fuel. [Heat supply news]. 2010. №7. P. 18–21. (Rus.)

9. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study. ACS Omega 2022, 7 (42). 37369–37378 DOI: 10.1021/acsomega.2c03979

10. Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Kravchenko I.V., A.A. Dekterev A.A., Kuznetsov V.A. Review of work on the preparation of coal-water fuel and its combustion in boilers. [Combustion and Plasma Chemistry]. 2021. 19. 265–277. DOI: 10.18321/cpc464 (Rus.).

11. Nakorchevsky A.I., Basok B.I. Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows. Kyiv: [Naukova Dumka]. 2001. ISBN 966-00-0815-5. ([Rus.])

12. Ivanitsky G.K., Korchinsky A.A., Matyushkin M.V. A mathematical model for the hydrodynamic processes in impact disperses. [Industrial Heat Engineering]. 2003. №1. P. 29–34. (Rus.)

13. Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Gozhenko L.P., Ivanytsky G.K. Pulsation-type cavitation reactor for the intensification of extraction processes. [International scientific and practical on-line conference "Problems of energy efficiency and automation in industry and agriculture". (11-12 november 2020 p.)] – Kropyvnytskyi: [CNTU], 2020. P. 201–202. <http://www.kntu.kr.ua/?view=science&id=6> (Ukr.)

Отримано 13.02.2023

Received 13.02.2023

УДК 551.582

ЕНЕРГЕТИКА, НАУКА І ІНЖЕНЕРІЯ СЬОГОДЕННЯ: СТАН ТА ВИКЛИКИ РОЗВИТКУ**Басок Б.І.**, член-кор. НАН України, **Базєєв Є.Т.**, канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ - 57, 03057*<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.5>

Наведено огляд проблем енергетики України, Європи і світу, проаналізовано виклики і ризики, які постали перед соціально-економічною сферою, академічною фундаментальною наукою внаслідок російської агресії, зокрема в галузі енергетики. Підкреслено роль науки як інтелектуального фундаменту для соціально-економічної, політичної і воєнної могутності держави. Наведено перелік фундаментальних і прикладних досліджень та розробок в галузі комунальної енергетики, що спрямовані для надійного енергозабезпечення житлових і громадських будівель. Ці дослідження сформували новий науковий напрям – фундаментальну теплофізичну інженерію. Наведено стан і тренди розвитку енергетики Європи і світу в контексті економічних загроз, цінової політики, ресурсної бази, технологій енергоперетворення і кінцевого низьковуглецевого енерговикористання.

An overview of the energy problems of Ukraine, Europe and the world is given, the challenges and risks faced by the socio-economic sphere, academic fundamental science as a result of Russian aggression, in particular in the field of energy, are analyzed. The role of science as an intellectual foundation for the socio-economic, political and military power of the state is emphasized. A list of fundamental and applied research and development in the field of communal energy, aimed at reliable energy supply of residential and public buildings, is provided. These studies formed a new scientific direction - fundamental thermophysical engineering. The state and trends of energy development in Europe and the world in the context of economic threats, price policy, resource base, energy conversion technologies and final low-carbon energy use are presented.

Бібл. 15, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: наука, енергетика, енергетична безпека, виклики і ризики, енергетична стійкість, комунальна енергетика, чиста енергія, фундаментальна теплофізична інженерія.

Вступ

Україна на шляху свого становлення та соціально-економічного розвитку проходила точки біфуркації, що змінювали сценарії та тренди розвитку країни. До них відносяться світова фінансова криза 2007 і 2009 років; пандемія COVID-2019 в 2020-2021 рр. Наразі з'явилася нова жакхлива точка біфуркації – у 2022 р. Україна зіткнулася з цивілізаційними викликами та ризиками, породженими неспровокованою війною росії проти України. Через це доводиться оцінювати можливості виживання та переглядати шляхи соціально-економічного розвитку країни в екстремальних умовах.

У статтях Вісника НАН України за 2022 рік провідні вчені представляли концепції та стратегії протистояння і протидії України зовнішнім та внутрішнім загрозам національній безпеці країни. Виклики постали перед усіма галузями економіки, перед українською наукою, у т.ч. і перед академічною наукою, пов'язаною із вирішенням проблем розвитку паливно-енергетичного комплексу країни.

Фундаментальні наукові основи. Як підкреслено в [1], наука сьогодення «є однією з найбільш конкурентних сфер діяльності та вагомим економічним ресурсом, що визначає рівень інноваційного розвитку держави, показником якого в світі вважають наукомісткість ва-

лового внутрішнього продукту та кількість дослідників на 1 млн населення». В [1] представлено наукові пошуки відповідей на гібридні загрози і аналізується поняття феномена національної стійкості як «здатності держави у взаємодії із суспільством зберігати стійкість до зовнішніх та внутрішніх агресивних впливів, оперативно реагувати на асиметричні загрози запровадженням змін та адаптацією без шкоди для основних цінностей суспільства, безперервно функціонувати під час криз, а також відновлюватися від руйнівних наслідків агресивних дій будь-якої природи (самовідновлення)».

Серед основних дев'яти пріоритетів стратегії національної стійкості України є енергетична стійкість як вагова складова економічної стійкості країни. А саме: «Енергетична стійкість потребує проведення моніторингу світового і регіональних енергетичних ринків та енергетичної політики держави в контексті усвідомлення актуальних загроз і викликів, а також можливостей протидіяти ним» [1].

Важливою складовою економічної політики воєнного часу має бути розроблення стратегічного плану заходів з реконструкції галузевої інфраструктури та відновлення нормального функціонування енергетики в умовах післявоєнного соціоекономічного розвитку країни. В енергетичному секторі України воєнного

періоду першочерговим завданням є мобілізація та оптимізація використання наявних енергоресурсів для надійного енергопостачання за сприянням ефективного енергоменеджменту. Енергобезпека, енергостійкість, енергогнучкість, енергоживучість і підвищення енергоефективності стає основним імперативом і пріоритетом політики в світі, а особливо в Європі та в Україні. Посилилась нагальна потреба скорочення викопного палива і збільшення відновлюваних джерел енергії та водню [2, 3]. Децентралізація енергопостачання, зелена енергетика, місцева енергетика – це тренд розвитку, викликаний війною. Він доповняє світові зусилля отримання чистої (низьковуглецевовмісної або вуглецевонеутральної) енергії, необхідної для унеможливлення або хоча б мінімізації пагубних наслідків глобального потепління клімату.

У вирішенні низки науково-технічних проблем, які з'явилися в процесі підготовки Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України до переходу на синхронну роботу з об'єднанням енергосистем європейських країн – ENTSO-E, активну участь брали профільні установи НАН України. Отримані результати дали змогу в складних умовах успішно реалізувати перехід ОЕС України на режим повної синхронізації з європейською енергетичною мережею ENTSO-E і відокремлення від енергетичних систем росії та білорусі, що істотно підвищує стійкість енергетичної системи України [4]. Успішно проведено пробні експортні поставки електроенергії в ЄС, більш того, в умовах дефіциту електроенергії внаслідок масованих неперервних бомбардувань енергетичної інфраструктури країни відбувся імпорту енергії із ЄС.

Стан енергетики України. Економічно невиправдане штучне підвищення цін на російські енергоносії для Європи в кінці 2021 року, що можна трактувати як економічно-енергетичну агресію, додалось для України в 2022 році повномасштабною війною із масовим знищенням населення, транспортної і житлової інфраструктури, а восени цього ж року доповнилось цілеспрямованим руйнуванням енергетики, тобто енергетичним тероризмом. Як результат – станом на 10 серпня 2022 р. через війну в комунальній теплоенергетиці України було пошкоджено або зруйновано 300 об'єктів [5], з серед них – 10 потужних ТЕЦ. А з 10 жовтня по 10 листопада 2022 р. пошкоджена або зруйнована третина (400 одиниць) об'єктів енергетичної (електричної, теплової, газової, водопостачання тощо) інфраструктури України, деякі жакливі дані наведені на рис. 1 [6]. Ракетні удари в листопаді-грудні 2022 р. були ще більш інтенсивнішими. Але найбільші і непоправимі

втрати згідно даних Всесвітньої організації охорони здоров'я [7] до жовтня 2022 року – це: 14 тисяч мирних українців загинули; 17,7 мільйона людей в Україні потребували гуманітарної допомоги; 7,5 мільйона – були вимушені переміститися до Європи; декілька мільйонів мешканців стали внутрішньо переселеними особами. Нині за даними міжнародної організації з міграції майже 2 млн українців переїхали в інше місце на зимівлю, побоюючись можливих проблем з теплопостачанням великих міст.

Порушення міжнародного права та основних принципів ядерної безпеки внаслідок захоплення військами РФ спочатку ЧАЕС, а потім ЗАЕС, створило загрозу як для України, так і для всього світу. Такі порушення кваліфікуються як ядерний тероризм [8].

Станом на грудень 2022 р. Україна зазнала прямих задокументованих збитків на \$136 млрд від російських атак на інфраструктуру, найбільше постраждала енергетика – такі дані Київської школи економіки [9]. За інформацією Мінінфраструктури України, внаслідок ракетних обстрілів Росією пошкоджено 592 об'єкти теплопостачання: 444 котельні, 13 ТЕЦ, 7 ТЕС та 128 центральних теплових пунктів. З них уже відновлено майже 300 об'єктів теплопостачання. На середину грудня 2022 р. збитки, завдані житловому фонду, досягли \$52,5 млрд. Частка житлового фонду в загальному обсязі збитків складає 38,6%. У Донецькій області зруйновано 78700 будинків (\$14,3 млрд), збитки Київщини від руйнувань та пошкоджень 22800 житлових будинків складають \$8,2 млрд. У столиці за час війни зруйновано та пошкоджено 348 житлових будинків, переважна більшість яких багатоквартирні, втрати на \$0,9 млрд. "Це політика знищення українців через створення умов, непридатних для життя. З наближенням зими російське керівництво свідомо позбавляє людей базових речей: води, електрики, тепла. Так само як свідомо прирікало на голодну смерть під час Голодомору 1932-1933 років.



Рис. 1. Динаміка російських ракетно-бомбових ударів по енергосистемі України [6, 31]

Це - тероризм і воєнний злочин", - заявив Генпрокурор України [6].

Приклади теплофізичних досліджень. В [10] узагальнено проблеми енергетики України, зокрема муніципальної енергетики, із урахуванням міст та селищ – забезпечення надійного енергопостачання житлових і громадських будівель та споруд в умовах військового та післявоєнного періодів. Наведено перелік пріоритетних наукових досліджень та науково-технологічних розробок, спрямованих на створення конкурентоспроможної продукції, необхідної в умовах воєнного стану для дотримання енергетичної безпеки й досягнення енергонезалежності країни і регіонів.

Досить глибокий аналіз щодо проблеми науки як комплексної проблеми, наприклад, співвідношення фундаментальної і прикладної науки, місця і ролі науки в післявоєнному відновленні, науки як інтелектуального фундаменту культурної, воєнної могутності держави й народів, надано в [11]. *«Саме наука, пізнаючи навколишній світ, відіграла ключову роль у масштабних соціальних змінах, забезпечивши сучасний рівень життя провідних країн світу, які й стали такими завдяки щедрій підтримці науки і науковців»* [11]. На жаль, як відмічає академік НАН України В.М. Локтев, що йому не відомий *«проект розвитку післявоєнної України, який має визначити шляхи її надзвичайного політико-економічного перетворення, зокрема подальшу демократизацію, лібералізацію, спрощення законодавства, в тому числі й наукової сфері, різке зменшення ролі і впливу, особливо політичного, олігархів, поступове приборкання корупційних відносин тощо»*. В статті поставлено кардинальне питання: яка наука потрібна Україні саме сьогодні, виходячи з найбільш пріоритетних фундаментальних наукових напрямів у світі. *«А такими, за даними журналу Science, є: квантові технології і фотоніка, математичне моделювання і штучних інтелект, перспективні функціональні матеріали, генетика і біомедицина, космічні технології, а також технології стійкого розвитку»*. Серед технологій стійкого розвитку безумовно повинна бути енергетична стійкість, яка є одночасно і вагомою складовою економічної стійкості, як це було відзначено в [1].

У відділі теплофізичних основ енергозберігаючих технологій (ТОЕТ) ІТТФ НАН України фундаментальні і прикладні розробки інноваційних пропозицій при викликах щодо модернізації та розвитку муніципальної енергетики (в умовах військового та післявоєнного періодів) виконуються в рамках наукового напрямку – методологія організаційно-економічного та інноваційного підвищення енергоефективності будівель

з урахуванням їх термомодернізації і тренду використання низьковуглецевих технологій. Такий підхід реалізується у тріаді енергетика-економіка-екологія стосовно сучасного технологічного укладу з метою збереження та підвищення життєдіяльності людини. Досить розгорнута характеристика наукового напрямку, що відображає сутність досліджень у відділі ТОЕТ, може бути узагальнена і сформульована більш стисло: фундаментальна теплофізична інженерія. Даний науковий напрямок може реалізовуватися для різних практичних програм і застосувань, зокрема може бути основою пріоритетних наукових досліджень та науково-технологічних розробок, спрямованих на створення нової конкурентоспроможної науково-технічної і енергетичної продукції, необхідної в умовах воєнного стану.

В якості прикладу наведемо деякі результати відділу ТОЕТ за період 2021-2022 років, зокрема:

- Розроблено модель і проведено дослідження процесів тепломасообміну при горінні пелет з рослинної сировини, що включає послідовне протікання стадій первинного розігріву біомаси, термічного її розкладання з виходом летючих газів, горіння летючих газів та горіння вуглецевого залишку. Встановлено розподіли температури в пелеті та в природно-конвекційному потоці повітря навколо окремої пелети, а також концентрації складових газової суміші, що утворюється в процесі горіння. Визначено зміну у часі маси та температури окремої пелети. Досліджено характеристики температурного режиму пелетного пальника малої потужності, одержано розподіли температури, швидкості повітря та концентрацій окремих складових газового середовища по об'єму пальника. Запропоновано оптимальні експлуатаційні режими промислового спалювання деревних та рослинних пелет.

- Розроблено чисельну модель перенесення теплоти в ґрунтовому пористому масиві, який містить U - подібний вертикальний теплообмінник, що є елементом теплонасосної установки «ґрунт-рідина». Такі теплообмінники широко застосовується для вилучення низькопотенційної теплоти з ґрунту з подальшим її використанням для автономного опалення та гарячого водопостачання приміщень і будівель різного призначення. Досліджено вплив фільтраційних властивостей ґрунту, як пористого середовища, на характеристики роботи ґрунтового теплообмінника. Визначено залежність теплообмінних характеристик роботи ґрунтового теплообмінника, як елемента теплонасосної системи, від характеристик середовища в порах, а також від пористості ґрунту та розміру його частинок.

- Проаналізовано тренди зміни клімату від глобального потепління. Представлено інноваційне-орієнтовані технології і науково-технічні заходи в напрямку підвищення енергоефективності використання енергоресурсів, зниження емісії шкідливих викидів та парникових газів і запропоновані адаптаційні заходи до змін клімату для комунальної енергетики, зокрема при енергозабезпеченні будівель житлово-комунального сектору з використанням інноваційних інженерно-будівельних рішень і низьковуглецевих технологій. Це відповідає прийнятій в Україні Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату.

- В контексті заходів із відновлення України розроблено теплофізичну модель процесів перетворення енергії та теплообміну в системі теплонасосної утилізації теплових скидів котельних установок на біомасі, що дозволяє визначати раціональні параметри таких систем в регіональних системах теплопостачання. Результати роботи впроваджено при проведенні теплового розрахунку та техніко-економічного аналізу інвестиційного проекту «Дооснащення біопаливної котельні конденсаційним утилізатором з тепловим насосом» принадно до біопаливної котельні встановленою тепловою потужністю 40 МВт», що впроваджується НЕК «Нафтогаз України» на базі теплових насосів виробництва ТОВ «Теплові насоси ВДЕ». Реалізація проекту дозволяє знизити рівень споживання біопалива котельнею у обсязі до 6,9 тис. т н.е. в рік з відповідним зниженням рівня забруднення атмосферного повітря.

Фундаментальна теплофізична інженерія. Зважаючи на отримані результати досліджень інфраструктури енергопостачання демонстраційного пасивного будинку та з метою поглиблення й розширення теорії і практики підвищення енергоефективності будівель, на найближчу перспективу визначено головні цілі наукових досліджень, предмети фундаментальних і прикладних досліджень, тематику, методи та інструментарій таких досліджень з урахуванням тренду змін клімату [12].

Фундаментальні дослідження. Предмет досліджень – розвиток науково-технічних основ розроблення енергоефективних технологій енергопостачання будівель житлово-комунальної сфери. Тематика досліджень:

- 1) поглиблення та розширення теорії теплообміну в конструкціях будівель, зокрема з урахуванням у тепловому балансі будівель пасивного внеску енергії сонячного випромінювання та інших чинників енергетичної взаємодії будівлі з довкіллям;

- 2) поглиблення і розширення теорії теплообміну в ґрунтових масивах при використанні для енергопостачання будівель геотермальної енергії верхніх шарів

ґрунту, а також для довготривалого акумулювання теплоти в ґрунтових масивах;

- 3) системний і безперервний облік протягом року всіх проявів кліматичних чинників (сонячної радіації, швидкості й напрямку вітру, температури і вологості зовнішнього повітря), аналіз їх впливу на теплопередачу через зовнішні елементи будівель.

Прикладні дослідження. Предмет досліджень – розроблення технологій енергоефективних систем енергопостачання будівель з урахуванням оптимізації архітектурно-планувальних рішень будівель. Тематика досліджень:

- 1) оцінка потенціалу і стану ринку паливно-ресурсної бази енергопостачання, в тому числі з урахуванням нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії;

- 2) експериментальні дослідження з розроблення науково-конструктивних рішень при створенні енергоефективних технологій та обладнання енергопостачання будівель з визначенням вихідних даних і залежностей для інженерних розрахунків обладнання та конструктивних елементів будівель;

- 3) розвиток методів поглибленого техніко-економічного аналізу енергоефективності енергопостачання будівлі;

- 4) розроблення організаційно-економічних і управлінських заходів та механізмів щодо підвищення ефективності енергопостачання будівель;

- 5) зміщення акцентів на енергетичну безпеку, стійкість, надійність, гнучкість, живучість та на ефективний ризиковий енергоменеджмент, зумовлений обставинами воєнного стану.

Вказані напрямки досліджень базуються на всебічному застосуванні технік і технологій високої енергоефективності та системно кореспондують із заходами виконання низки Законів України, прийнятих останнім часом в цій сфері енергетики, зокрема законів: «Про енергетичну ефективність будівель»; «Про енергетичну ефективність»; «Про Фонд енергоефективності»; «Про запровадження нових інвестиційних можливостей, гарантування прав та законних інтересів суб'єктів підприємницької діяльності для проведення масштабної енергомодернізації», «Про внесення змін до деяких законів України щодо усунення бар'єрів для масштабної термомодернізації будівель» та із Національними планами: планом дій з енергоефективності до 2030 року; планом з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року; планом дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року і планом збільшення кількості будівель з близьким до нульового споживання енергії. Тобто, попри певний

Таблиця.

№	Завдання	Захід	Відповідальний
7.4.1.	Розробити та впровадити вітчизняну (або закупити закордонну) єдину по країні розрахункову комп'ютерну програму енергоаудиту будівель (житлових, громадських, комерційних, муніципальних, бюджетної сфери тощо та інженерних систем їх ресурсо(енерго)забезпечення	Загальнодоступне використання єдиної програми, адаптованої до законодавства та нормативно-технічної бази України (з відповідними поточними змінами) з енергоаудиту будівель. Призначити головну організацію-утримувача такої програми із функціями постійної підтримки програми і її оперативного оновлення із врахуванням поточного та перспективного стану енергоефективності будівель.	Мінінфраструктура України Держенергоефективність МОН України НАН України
7.4.2.	Розробити та впровадити загальнодержавну розрахункову комп'ютерну програму моніторингу енергоефективності будівель	Загальнодоступне використання єдиної програми, адаптованої до законодавства та нормативно-технічної бази України (з відповідними поточними змінами) з енергоефективності будівель. Призначити головну організацію-утримувача такої програми із функціями постійної підтримки програми і її оперативного оновлення із врахуванням поточного та перспективного стану енергоефективності	Держенергоефективність, Мінінфраструктура НАН України МОН України
7.4.3.	Запровадити учбові (бакалавр магістр) та наукові (PhD, доктор наук) спеціальності: «енергоефективність»; «енергоефективність будівель»; «енергоменеджмент»; «енергомоніторинг» у ЗВО та інших інститутах відповідного профілю.	Реалізувати належне державне замовлення за вказаними спеціальностями	МОН України НАН України
7.4.4.	Забезпечити науковий, інноваційний, технологічний, технічний супровід довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року з врахуванням економічних можливостей та екологічних вимог післявоєнного оновлення країни та світових тенденцій декарбонізації енергетики	Започаткування та реалізація цілеспрямованих наукових досліджень з енергоефективності взагалі і, зокрема, з енергоефективності будівель, створення інновацій, пілотних проектів та дослідно-промислових об'єктів пасивних будівель, будівель «нудь-енергії»; «розумних» будівель, включаючи повномасштабні висотні новобудови і споруди.	Мінінфраструктура Держенергоефективність НАН України МОН України Національний фонд досліджень України
7.4.5.	Пропаганда енергоощадливого стилю життя суспільства і кожного окремого громадянина України як домінант стійкого розвитку людства.	Переконлива, дохідлива, просто обґрунтована і нав'язлива реклама та пропаганда енергоефективності життєдіяльності населення і кожного громадянина України. Видача ліцензій ЗМІ із обов'язковою реалізацією певного обсягу контенту про енергозбереження, енергозаощадження і енергоефективність.	Міністерство культури та інформаційної політики України, Держкомтелерадіо, Мінінфраструктура України, НАН України, МОН України

опір фінансово-промислових груп, Україна, як і весь цивілізований енергетичний світ, вибрала тренд енергетичного розвитку, що ґрунтується на енергоефективності та енергомодернізації, використанні відновлюваних джерел енергії, протидії пагубним впливам глобального потепління, використанні наукових та технічних інновацій.

В конкретизацію і реалізацію такого підходу в другій половині 2022 року були розроблені матеріали Довгострокової стратегія термомодернізації до 2050 року; державна цільова програма підтримки термомодернізації до 2030 року (Концепція); державна цільова програма стимулювання енергетичної модернізації систем централізованого теплопостачання до 2030 року. Наразі опрацьований Операційний план заходів виконання завдань першого періоду «Перший середньостроковий план термомодернізації будівель до 2027 року» першого етапу «Відновлення та усунення бар'єрів» на період 2021-2030 роки» Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року. Президія НАН України прийняла цю ініціативу і за поданням ІТТФ НАН України запропонувала доповнити Операційний план наступними заходами, що наведені в таблиці.

Стан енергетичної Європи. Окремо відмітимо, що якщо енергетика України зазнала прямих пошкоджень та руйнувань, то і енергетика Європи відчула потрясіння, які викликані російським агресивним енергетично-фінансовим шантажем. За останні місяці Європа, ймовірно, вже пережила найгіршу кризу, яка виникла після повномасштабного вторгнення росії. Вона коштувала близько 1 трильйона доларів через різке зростання цін на енергоносії [13]. Уряди країн ЄС надали понад 700 мільярдів доларів прямої допомоги, щоб посприяти компаніям і споживачам подолати цей удар. Доволі м'яка погода, більш широкий спектр постачальників і спроби скоротити попит допомогли, оскільки запаси газу все ще майже заповнені, а ціни впали до довоєнного рівня. ЄС більше не імпортує вугілля та сиру нафту з росії, а поставки газу значно скоротилися. Збільшилися поставки газу з Норвегії та поставки зрідженого газу з Катару, США та інших виробників. У Німеччині сховища вдалось заповнити на 91% у порівнянні з 54% рік тому, коли росія вже спустошувала контрольовані нею потужності зберігання. Відтоді уряд ФРН націоналізував місцеві підрозділи ПАТ «Газпром» і витратив мільярди євро на наповнення резервів, включаючи оперативне будівництво двох LNG-терміналів, а в планах будівництво ще трьох.

Очікується, що європейське споживання протягом 2023 року буде приблизно на 16% нижче середнього рівня за п'ять років (звіт Morgan Stanle). Розширення потужностей відновлюваної енергетики ЄС також сприяють подоланню кризи. За даними S&P Global, зростання вітрової та сонячної енергії допоможе скоротити цього року виробництво електроенергії на газу на 10 найбільших енергетичних ринках Європи на 39%. Можливий імпорт російського трубопровідного газу 2023 року становитиме лише п'яту частину звичайного рівня – близько 27 мільярдів кубометрів – і це «велике скорочення для ринку (ЄС), який споживав у 2021 році 400 мільярдів кубометрів газу» [13]. Причому ціну на природний газ із Росії обмежили значенням не більше 180 євро за 1 МВт·годину. На початок лютого 2023 р. ЄС вибрав із підземних сховищ газу лише 30 млрд куб. м газу. Наразі ПСГ Європи заповнені на 71,64% – на 19,83% вище, ніж у середньому на цю дату за останні п'ять років, у них міститься 77,5 млрд куб. м газу [14]. Також акцентуємо, що успішному подоланню енергетичної кризи в ЄС ефективно сприяли пакет Fit for 55 і оперативно прийнятий в березні 2022 р. план REPowerEU.

Стосовно трендів розвитку світової енергетики зазначимо, що дві кризові біфуркації – пандемія Covid-19 і вторгнення росії в Україну – призвели до серйозних збоїв у глобальних ланцюгах забезпечення енергією та новими технологіями її виробництва. Подолати ці проблеми можна на основі фундаментальної енергетичної науки і інженерії та енергетичної економіки, реалізуючи відповідну енергетичну, кліматичну та індустріальну політику і забезпечивши енергетичну безпеку, стійкість та живучість. Не лише в Європі, а у всьому світі відбувається зростання цін на енергію і супутні їй матеріали [15], рис. 2.

Ризикова концентрація виробництв. Енергія, є ключовим компонентом витрат на виробництво товарів, особливо у важкій промисловості. Природний газ та електроенергія – це два основних джерела енергії для виробників матеріалів і технологій, ціни на які відрізняються залежності від географії походження і виробника. Як видно із графіків ціни в США дещо менші, ніж у іншому світі, а тому надають структурну перевагу для виробників енергоємної продукції. Щодо технологій масового виробництва устаткування для чистої енергії, такого як вітроагрегати, електроаккумулятори, електролізери, сонячні батареї та теплові насоси, то на три найбільші країни-виробники припадає 70% виробничих потужностей для кожної технології, причому Китай домінує в усіх з них [15], рис. 3. Територіальний

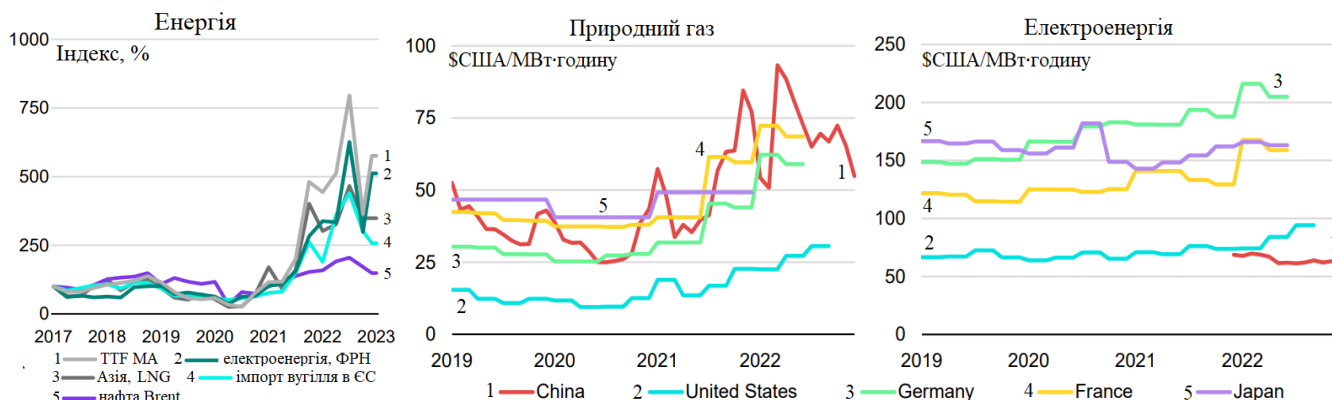


Рис. 2. Зростання осереднених цін на енергоресурси. Примітка: LNG – скраплений природний газ; TTF MA (Title Transfer Facility) спотові ціни на природний газ на Нідерландському хабі. Ціни є середніми квартальними значеннями, проіндексованими (індекс=100) по даним на початок 2017 року. Дані по ФРН є місячними середніми значеннями

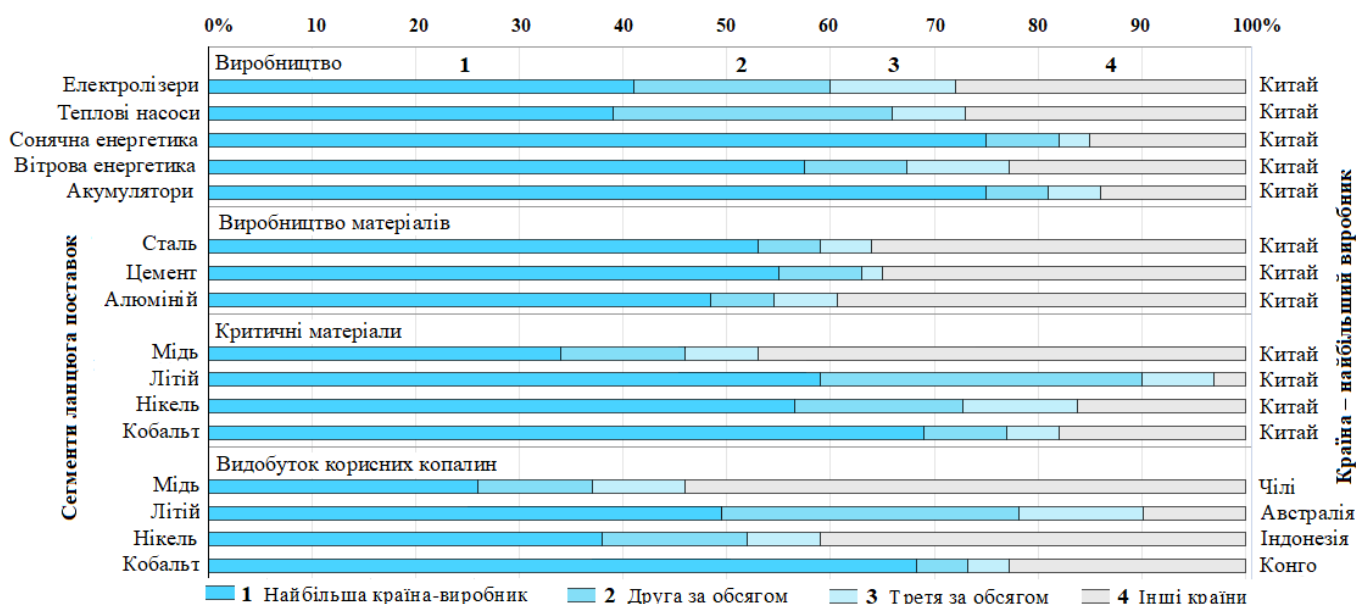


Рис. 3. Географічна концентрація за сегментами ланцюга поставок, 2021 рік

розподіл найважливіших корисних копалин пов'язаний із запасами ресурсів, і подекуди значна їх частина є концентрованою в одній країні. Зокрема, Конго виробляє 70% світового кобальту, і лише три країни виробляють понад 90% світового обсягу літію. Інший приклад, ціни на сталь і мідь приблизно подвоїлися між першою половиною 2020 року та тим самим періодом 2022 року. Середня ціна на літій у 2022 році була майже в чотири рази вищою, ніж у 2019 році, вдвічі зросли ціни на кобальт і нікель. Наведені дані вказують на певні вразливості, виклики і навіть ризики стійкому світовому енергопереходу на низьковуглецеву енергетику, тобто на чисту

енергію. Ціновий шантаж росії на поставки природного газу в Європу в четвертому кварталі 2021 року є тому яскравим прикладом. Інший приклад – недавня криза виробництва електронних чипів через нехватку рідкоземельних матеріалів. На Китай припадає більшість поточних оголошених планів розширення виробничих потужностей до 2030 року для сонячних фотоелектричних компонентів (близько 85% для елементів і модулів та 90% для фотоповітряних); для компонентів шельфових вітроагрегатів (близько 85% для лопатей і близько 90% для гондол і башт); і для компонентів акумуляторів електромобілів (98% для матеріалу анода та 93%

для матеріалу катода). Виняток становлять водневі електролізери: близько чверті оголошених виробничих потужностей до 2030 року припадає відповідно на Китай і ЄС, а ще 10% – на Сполучені Штати. Характерно, що видобуток руд критичних матеріалів контролюють різні країни (нижній блок діаграми рис. 3), а вже наступний крок ланцюга поставок, тобто критичні матеріали із більшою доданою вартістю, підконтрольні Китаю. Обсяги виробництва Китаєм сипучих матеріалів (наступний блок на рис. 3) – половина світового обсягу і повне домінування в кінцевому виробництві устаткування для чистої енергетики: електролізери – 41%, теплові насоси – 39%, сонячна фотовольтаїка – 75%, вітрова енергетика – 58%, і електроакумулятори – 75%. Через це є виклики відсутності диверсифікації виробництв, високої географічної концентрації видобутку та переробки первинних матеріалів і ресурсів, а також монополізму технологій і виробництв. Таке становище повинно привернути увагу енергетичної спільноти до змін парадигми світової енергетичної безпеки.

В якості прикладу взаємодії вхідних матеріалів, енергії, устаткування, процесів і технологій на рис. 4 наведена схема виробництва водню і вуглекислого газу. Композиція такої схеми визначається фундаментальними підходами і співвідношеннями енергетичної інженерії.

Реалізувати такий ланцюг виробництва, наприклад теплових насосів, безпечним, гнучким та стійким мож-

на лише за допомогою комплексного та скоординованого підходу. Це означає своєчасне вжиття заходів для розвитку поставок, які можуть задовольнити потреби шляху до чистого нуля викидів парникових газів; які можуть пристосовуватися та відновлюватися після короткострокових потрясінь; які можуть адаптуватися до довгострокових змін у постачанні, включаючи періодичну нестачу матеріалів, вплив зміни клімату та стихійні лиха, екстремальні стани, а також інші потенційні збої на ринку.

Стан світової енергетики. Однак, незважаючи на швидке зростання останнім часом технологій чистої енергії, сьогодні загалом світ все ще покладається на викопне паливо для свого енергопостачання (рис. 5) [15]. Зростання постачання чистої енергії з 2000 року було нижчим, ніж зростання нафти, газу та вугілля, особливо в країнах із економікою, що розвивається. У цих країнах частка викопного палива в загальному обсязі первинної енергії зросла з 77% у 2000 році до 80% у 2021 році, в основному через збільшення обсягів вугілля з 27% до 35%. У розвинутих економіках частка впала з 82% до 77% за той самий період. У результаті загальна частка викопної енергії в глобальному енергетичному балансі залишилася майже незмінною на рівні близько 80%.

Нафта залишається найбільшим джерелом первинної енергії, становлячи 29% від загального обсягу енергопостачання у 2021 році (зменшення з 37% у 2000 році), потім розташоване вугілля з 26% (зро-

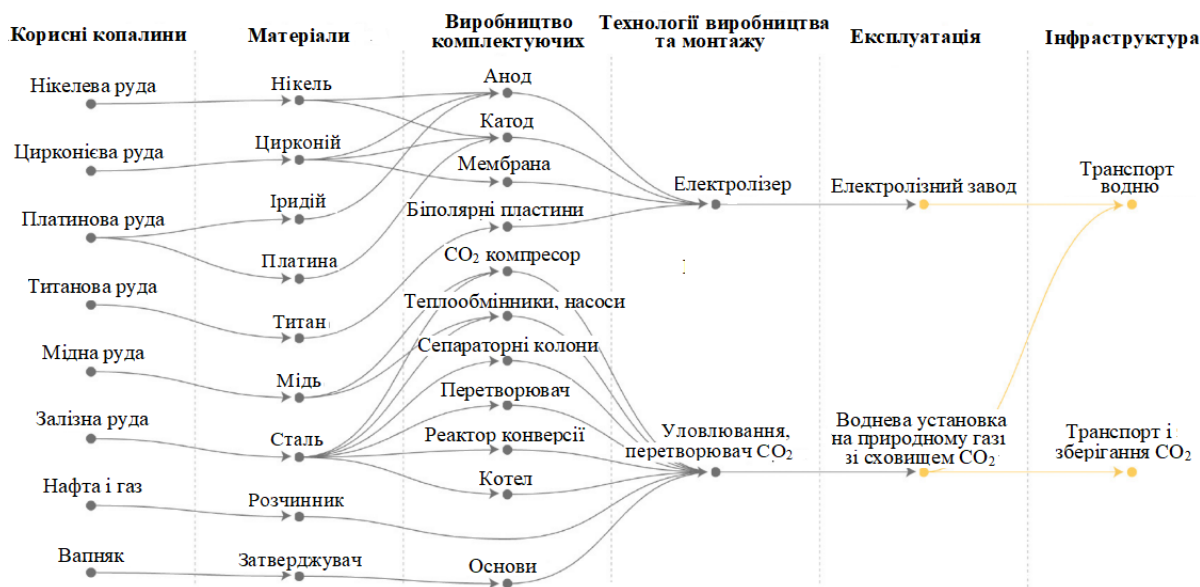


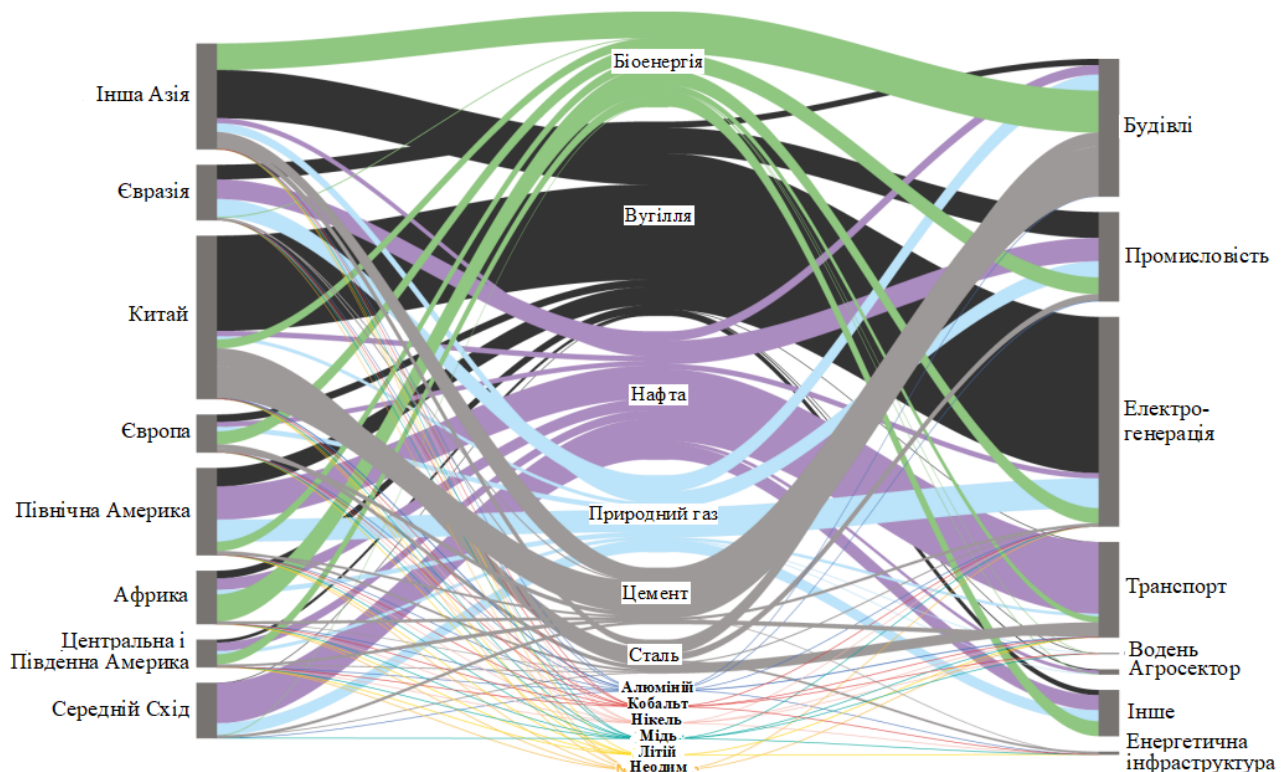
Рис. 4. Ключові елементи для кожного кроку в інженерному ланцюгу постачання чистої енергії з водню з низьким рівнем викидів (включаючи технологічні ланцюги поставок для електролізерів і установок на основі природного газу з уловлюванням і зберіганням вуглецю [CCS])

стання з 23%) і природний газ з 23% (зростання з 21%). Біоенергія все ще залишається найбільшим джерелом невикопної енергії, на яку припадає близько 10% від загального споживання первинної енергії у 2021 році, з них понад третина у формі традиційної біомаси, яка часто використовується неефективно. Атомна енергія становить 5% від загального обсягу поставок, гідроенергія – близько 2%, а сонячна та вітрова – лише 2%. Хоча електрифікація прискорилося за останні два десятиліття, викопне паливо все ще домінує в кінцевому споживанні енергії, на нього припадає близько 35% загального споживання енергії в будівлях і 95% на транспорті.

Глобальний перехід до чистої енергії з майже нульовими викидами CO₂ наразі повинен прискоритися завдяки поєднанню політики, технологічних змін та економіки. Потреба різко та терміново скоротити викиди парникових газів перед фактом все більш вражаючих доказів глобальної зміни клімату зараз широко визнана, що відображається у все більш амбітних національних цілях. Глобальна енергетична криза через війну росії в Україні посилила занепокоєння енергетичною безпекою щодо постачання традиційних видів палива, таких як нафта та газ, надаючи додатковий поштовх потребі та політичній підтримці чистих енергетичних технологій.

Станом на кінець листопада 2022 року 87 країн і Європейський Союз оголосили про зобов'язання скоротити викиди до нуля цього століття, охоплюючи понад 85% світових викидів і 85% валового внутрішнього продукту. Аналогічні заяви включають мету Китаю з 2021 року досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року, ціль Індії – нульові чисті викиди до 2070 року та нульові чисті викиди Індонезії до 2060 року. Якщо всі оголошення та цілі будуть виконані в повному обсязі та вчасно, їх буде достатньо, щоб утримати підвищення глобальної температури приблизно до 1,7°C у 2100 році [15].

Висновок. За останнє десятиліття впровадження чистих енергетичних технологій і постачання енергії з невикопних джерел, зокрема з відновлюваних джерел, стрімко прискорилося. У 2022 році на відновлювані джерела енергії припадало 30% світового виробництва електроенергії, порівняно з менш ніж 20% у 2010 році, із помітним збільшенням виробництва сонячної фотоелектричної, вітрової, гідроенергії та біоенергії [15]. Електрифікація прискорюється в усіх секторах кінцевого використання, включаючи теплозабезпечення будівель. У сфері транспорту продажі електромобілів у 2022 році перевищили 10 мільйонів або 13% світового автомобільного ринку, в результаті



*Рис. 5. Глобальна географія енергоресурсів і розподіл енергії по галузям світової економіки, 2021 рік.
Фізичні масові потоки палива і матеріалів в енергетичній системі, млн тон*

чого їх загальна кількість на дорогах світу перевищила 25 мільйонів, порівняно з практично нульовим показником у 2010 році. У 2021 році в усьому світі працювало понад 1000 теплових гігават теплових насосів, порівняно з приблизно 500 ГВт у 2010 році, а продажі зросли на 13% порівняно з 2020 роком. Аналіз показує, що світовий ринок ключових екологічно чистих енергетичних технологій до 2030 року становитиме приблизно 650 мільярдів доларів США на рік (що більш ніж у три рази перевищує сьогоднішній рівень), якщо країни світу повністю виконають свої оголошені обіцянки щодо енергетики та клімату. Пов'язані з цим робочі місця у виробництві чистої енергії зростуть більш ніж удвічі з 6 мільйонів сьогодні до майже 14 мільйонів до 2030 року – і в наступні десятиліття очікується подальше швидке зростання промисловості та зайнятості.

Оптимальне рішення залучення в енергобаланс різних енергоресурсів та енергоносіїв полягає не в протиставленні їх один одному, а в розумному техніко-економічно та екологічно обґрунтованому поєднанні, що звичайно вимагає поглиблення та розширення наукових основ з теорії та практики проведення техніко-економічного аналізу енергетичних технологій з урахуванням сучасних інтелектуальних та обчислювальних можливостей у інноваційній цифровій економіці. Особливо важливо в воєнний час врахування реалій і проведення ретельних розрахунків можливих сценаріїв розвитку енергетики з дотриманням балансу між національними (безпековими, економічними тощо) інтересами і світовою політикою покращення екології довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пирожков С.І. Про національну доповідь НАН України «Національна стійкість України: стратегія відповіді на виклики та випередження гібридних загроз» // Вісник НАН України, №5, 2022. – С. 45-55. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.045>
2. Гесць В.М. Про оцінку економічних втрат України внаслідок збройної агресії росії // Вісник НАН України, №5, 2022. – С. 30-38. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.030>
3. Мележик О.О. Із зали засідань Президії НАН України // Вісник НАН України, №5, 2022. – С. 7-8.
4. Кириленко О.В. Особливості роботи Об'єднаної енергетичної системи України в синхронному режимі з європейською континентальною енергетичною системою // Вісник НАН України, №5, 2022. – С. 66-72. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.039>
5. Підготовка до проходження опалювального періоду в умовах воєнного стану. Матеріали семінару USAID, 12 серпня 2022 р.
6. <https://www.unian.ua/economics/energetics/obstril-ukrajini-skilki-raziv-rosiya-atakuvala-ob-yekti-elektroenergetiki-12022740.html>
7. <https://www.reuters.com/article/ukraine-crisis-who/who-report-on-ukraine-health-emergency-sparks-u-s-russia-row-idUSKBN2UE086>
8. Носовський А.В. Щодо наслідків тимчасової окупації території зони відчуження Чорнобильської АЕС // Вісник НАН України, №6, 2022. – С. 39-44. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.066>
9. <https://thepage.ua/ua/news/ukrayina-vtratila-dollar136-mlrd-vid-atak-na-infrastrukturu-najbilshepostrazhdala-energetika-kse>
10. Кириленко О.В., Снежкін Ю.Ф., Басок Б.І., Базєєв Е.Т. Енергетика України: ймовірні сценарії відновлення та розвитку // Вісник НАН України, (9), 22-37. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.022>
11. Локтев В.М. Наука і перемога, або війна як casus belli наукових реформ // Вісник НАН України, №6, 2022. – С. 27-40. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.027>
12. Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т., & Кураєва, І. В. (2021). Адаптація комунальної теплоенергетики до змін клімату // Вісник НАН України, (4), 60–75. <https://doi.org/10.15407/visn2021.04.060>
13. Putin's Energy Gambit Fizzles as Warm Winter Saves Europe. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-08/warm-winter-helps-europe-overcome-the-worst-of-russia-s-energy-squeeze?srnd=premium-europe>
14. Євросоюз вибрав із ПСГ 30 млрд кубів газу. <https://newsyou.info/2023/02/yevrosoyuz-vibrav-iz-psg-30-mlrd-kubiv-gazu>
15. IEA (2023), Energy Technology Perspectives 2023, IEA, Париж. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

ENERGY, SCIENCE AND ENGINEERING TODAY: THE STATE AND CHALLENGES OF DEVELOPMENT

B.I. Basok, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, **E.T. Bazeev**, PhD (Engin.)

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.5>

Abstract. An overview of the energy problems of Ukraine, Europe and the world is given, the challenges and risks faced by the socio-economic sphere, academic fundamental science as a result of russian aggression, in particular in the field of energy, are analyzed. The role of science as an intellectual foundation for the socio-economic, political and military power of the state is emphasized. A list of fundamental and applied research and development in the field of communal energy, aimed at reliable energy supply of residential and public buildings, is provided. These studies formed a new scientific direction-fundamental thermophysical engineering. The state and trends of energy development in Europe and the world in the context of economic threats, price policy, resource base, energy conversion technologies and final low-carbon energy use are presented.

References 15, figures 5, tables 1.

Keywords: science, energy power, energy security, challenges and risks, energy sustainability, communal energy, clean energy, fundamental thermophysical engineering.

1. *Pirozhkov S.I.* About the national report of the National Academy of Sciences of Ukraine "National stability of Ukraine: a strategy for responding to challenges and anticipating hybrid threats" // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 5, 2022. – P. 45-55. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.045>

2. *Geets V.M.* On the assessment of Ukraine's economic losses as a result of Russia's armed aggression // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 5, 2022. – P. 30-38. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.030>

3. *Melezhik O.O.* From the meeting hall of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 5, 2022. – P. 7-8.

4. *Kirylenko O.V.* Peculiarities of the operation of the United Energy System of Ukraine in synchronous mode with the European continental energy system // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 5, 2022. – P. 66-72. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.039>

5. *Preparation for the heating period under martial law.* Materials of the USAID seminar, August 12, 2022.

6. <https://www.unian.ua/economics/energetics/obstril-ukrajini-skilki-raziv-rosiya-atakuvala-ob-yekti-elektroenergetiki-12022740.html>

7. <https://www.reuters.com/article/ukraine-crisis-who/who-report-on-ukraine-health-emergency-sparks-u-russia-row-idUSKBN2UE086>

8. *Nosovsky A.V.* Regarding the consequences of the temporary occupation of the exclusion zone of the Chornobyl NPP // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 6, 2022. – P. 39-44. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.066>

9. <https://thepage.ua/ua/news/ukrayina-vtratila-dollar136-mlrd-vid-atak-na-infrastrukturu-najbilshe-postrazhdala-energetika-kse>

10. *Kirylenko O.V., Snezhkin Y.F., Basok B.I., Bazeev E.T.* Energy of Ukraine: probable scenarios of recovery and development // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (9), 22-37. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.022>

11. *Loktev V.M.* Science and victory, or war as a casus belli of scientific reforms // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 6, 2022. – P. 27-40. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.027>

12. *Basok, B.I., Bazeev, Y.T., & Kuraeva, I.V.* (2021). Adaptation of communal heat energy to climate changes // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (4), 60–75. <https://doi.org/10.15407/visn2021.04.060>

13. *Putin's Energy Gambit Fizzles as Warm Winter Saves Europe.* <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-08/warm-winter-helps-europe-overcome-the-worst-of-russia-s-energy-squeeze?srnd=premium-europe>

14. *The European Union* selected 30 billion cubic meters of gas from UGS. <https://newsyou.info/2023/02/yevrosyuz-vibrav-iz-psg-30-mlrd-kubiv-gazu>

15. *IEA (2023), Energy Technology Perspectives 2023*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

Отримано 11.02.2023

Received 11.02.2023

УДК 620.92

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ТА ПИТАНЬ СТАЛОСТІ ВИРОБНИЦТВА РІДКИХ МОТОРНИХ БІОПАЛИВ В ЄС ТА В УКРАЇНІ

Гелету́ха Г.Г., докт. техн. наук, Желі́зна Т.А., канд. техн. наук, Драгнєв С.В., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.6>

Проаналізовано поточний стан та перспективи розвитку ринку моторних біопалив в ЄС з урахуванням цілей Директиви RED II. Розглянуто підходи Єврокомісії до питань сталості виробництва біопалив. Визначено бар'єри для розвитку ринку рідких біопалив в Україні, запропоновано шляхи їх подолання.

The current state and prospects for the development of motor biofuels market in the EU are analysed, taking into account the goals of Directive RED II. The European Commission's approach to sustainability issues of biofuel production are considered. Barriers to the development of the liquid biofuels market in Ukraine are identified, and ways to overcome them are suggested.

Бібл. 15, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, рідкі біопалива, просунуті біопалива, біодизель, біоетанол, критерії сталості.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВКЕ – валове кінцеве енергоспоживання;

ВХО – використана харчова олія;

НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики;

ПГ – парникові гази;

РБП – рідке біопаливо;

САП – стале авіаційне паливо;

н.е. – нафтовий еквівалент;

с/г – сільське господарство.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю глобальної декарбонізації економіки, зокрема транспортного сектору, який важко піддається цьому процесу у порівнянні з іншими секторами енергетики. Ефективним заходом в даному напрямку є перехід на рідкі моторні біопалива, у тому числі просунуті (II покоління). **Метою** роботи є аналіз перспектив виробництва і використання рідких біопалив в Україні та розробка відповідних рекомендацій для розвитку даного напрямку із врахуванням питань сталості. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Поточний стан ринку рідких моторних біопалив у світі та в ЄС

Обсяг виробництва рідких моторних біопалив у світі складає сьогодні більше 170 млрд л/рік, у тому числі біоетанолу – 111 млрд л/рік, біодизелю – 53 млрд л/рік (2021 р.). У порівнянні з 2016 р. (140 млрд л), ріст загального виробництва становить понад 20%. Світовими лідерами з виробництва біоетанолу є США (близько 57 млрд л у 2021 р., сировина – зерно кукуруд-

зи) і Бразилія (33 млрд л, сировина – цукрова тростина). У виробництві біодизелю лідирують Європа (майже 17 млрд л у 2021 р.), США (10 млрд л) та Індонезія (більше 8 млрд л). Основними видами сировини для отримання біодизелю є пальмова олія (39%), соєва олія (25%) і ріпакова олія (14%) [1, 2].

Основним моторним біопаливом в ЄС є біодизель. За даними 2020 р., його споживання в ЄС-27 склало 13,0 млн т н.е. (16,6 млрд л), тоді як біоетанолу – лише 2,4 млн т н.е. (4,8 млрд л), а біогазу – 321 тис. т н.е. (табл. 1). На просунуті (тобто не I покоління) рідкі біопалива припадає 8,4% від загального обсягу споживання РБП, або 8,2% від обсягу всіх моторних біопалив (включаючи біогаз).

Власним виробництвом (біодизель – близько 12 млрд л/рік, біоетанол – більше 5,5 млрд л/рік) ЄС задовольняє більшу частину попиту на біодизель і може повністю покрити споживання біоетанолу, хоча на практиці відбувається його імпорт та експорт [4, 5]. Основною сировиною для виробництва біодизелю в ЄС є ріпакова олія, для виробництва біоетанолу – зерно кукурудзи, що відповідає отриманню рідких біопалив I покоління.

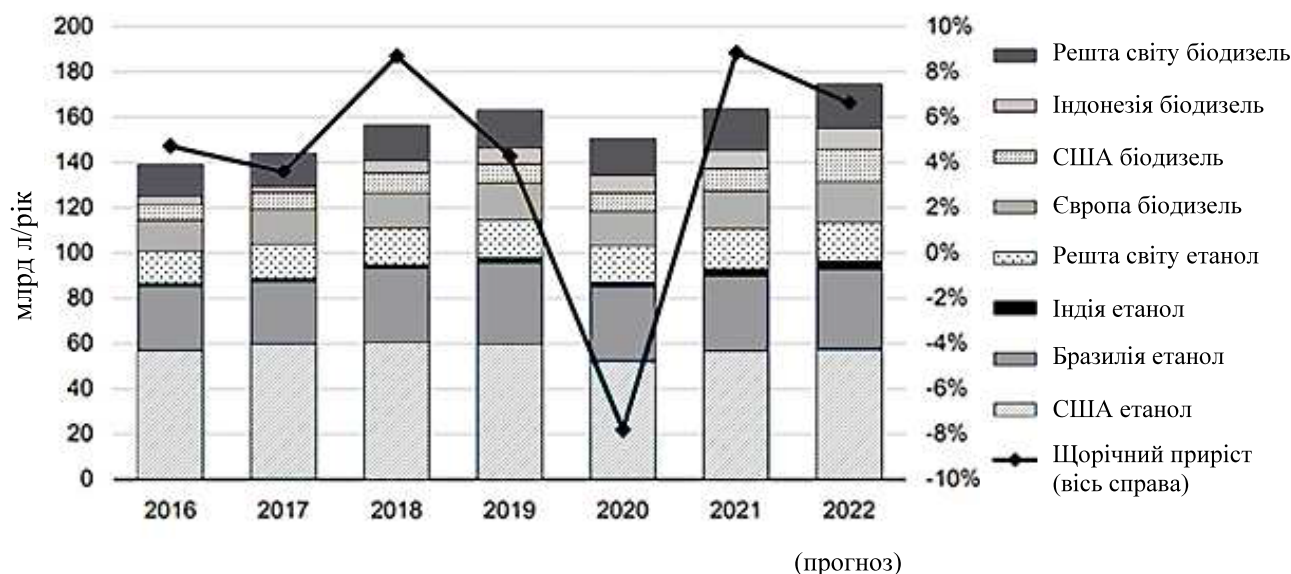


Рис. 1. Динаміка виробництва моторних біопалив у світі, млрд л [1]

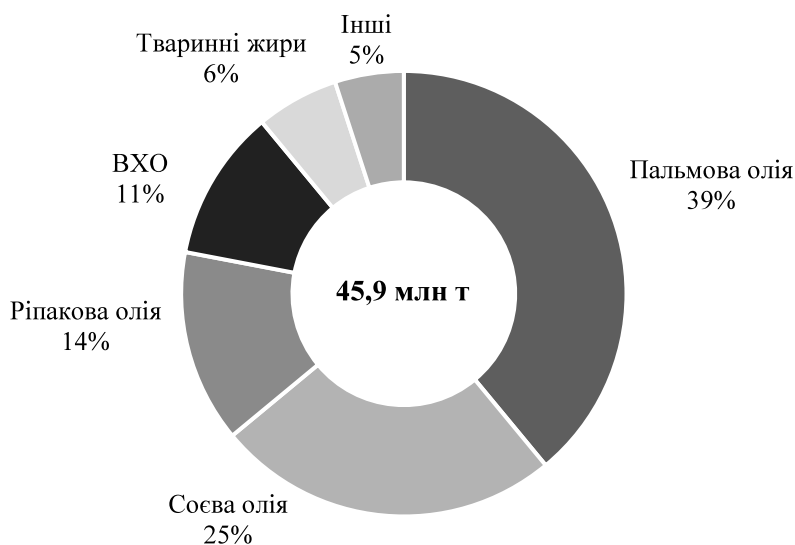


Рис. 2. Структура сировини для виробництва біодизелю у світі (2019 р.) [2]

Аналіз цілей Директиви ЄС RED II щодо частки ВДЕ на транспорті

За даними 2020 р. [6], частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії в секторі транспорту ЄС становить 10,2%, що свідчить про виконання цілі Директиви 2009/28/ЄС (RED I) – 10% ВДЕ на транспорті до 2020 р. Лідером даного напрямку є Швеція з часткою ВДЕ на транспорті у 2020 р. майже 32%. Це пов'язане з високою часткою споживання в країні рідких біопалив, що зараховуються у виконання цілі згідно визначених критеріїв.

Директива ЄС 2018/2001 (RED II) [7], прийнята в кінці 2018 р., є оновленим варіантом Директиви 2009/28/ЄС, який визначає цілі з розвитку ВДЕ в Європейському Союзі до 2030 року. Зокрема, Директивою RED II поставлено за мету досягти частки ВДЕ в кінцевому енергоспоживанні сектору транспорту ЄС не менше 14% у 2030 р., у тому числі просунутих рідких біопалив та біогазу, вироблених з сировини із Частини А Додатку IX Директиви – щонайменше 3,5%. Термін «просунуті» застосовується тільки для рідких біопалив: такими вважаються біопалива, отримані з видів сиро-

Табл. 1. Споживання біопалив у секторі транспорту ЄС у 2020 р., тис. т н.е. [3]

Країни ЄС (вибрані)	Біодизель	Біоетанол	Біогаз	Всього	Просунуті біопалива	Біопаливо з ВХО та тваринних жирів
Німеччина	2568,2	701,6	76,0	3345,8	17,6	667,4
Франція	2078,2	554,7	0,6	2633,5	47,8	182,3
Іспанія	1447,7	98,0	0,0	1545,7	67,0	486,4
Італія	1245,1	19,6	82,1	1346,8	407,6	536,5
Швеція	995,3	66,9	109,5	1171,6	244,9	58,8
Польща	864,4	89,6	0,0	954,0	0,0	0,0
Бельгія	568,7	97,3	0,0	666,0	16,7	38,8
Нідерланди	301,4	226,4	34,6	562,4	88,6	413,4
Австрія	469,4	49,1	0,4	519,0	0,0	0,4
Румунія	314,5	97,8	0,0	412,3	0,0	0,0
Фінляндія	304,1	92,5	6,9	403,5	377,6	0,0
Чехія	308,8	65,5	0,0	374,3	0,0	53,3
Разом ЄС-27	13011,9	2445,7	321,4	15778,9	1292,4	3144,5
Частка від загального	82%	15%	3%	100%	8,2%	20%

вини, перелічених в частини А Додатку IX RED II. Ця сировина включає різні види лігноцелюлозної біомаси (наприклад, солома, лушпиння, обрушені качани кукурудзи, кора, тирса, трав'янисті і деревоподібні енергосировини) та деякі інші види біомаси.

Для просунутих біопалив може застосовуватися подвійне зарахування (по енерговмісту) щодо виконання цілей по частці ВДЕ на транспорті в ЄС. Подвійне зарахування застосовується також до рідких біопалив, вироблених з сировини із частини В Додатку IX Директиви – використаної харчової олії та певних видів тваринних жирів. В документі Європарламенту [8] ця сировина доречно названа сировиною «з високим потенціалом сталості».

Директива RED II обмежує частку рідких біопалив, вироблених з харчової/кормової сировини (тобто біопалив I покоління – не просунутих), у досягненні цілей з ВДЕ на транспорті. Частка таких біопалив в певній країні ЄС може бути не більш, ніж на 1% вище частки цих біопалив у валовому кінцевому споживанні енергії дорожнім та залізничним транспортом цієї країни у 2020 р., але не більше 7%. Наприклад, для України це означає, що частка РБП I покоління у ВКЕ на транспорті у 2030 р. не може перевищувати 1,85%, оскільки у 2020 р. цей показник був 0,85% [9].

У RED II рідкі біопалива I покоління додатково розділяються на такі з високим або низьким ризиком непрямої зміни землекористування. Високий ризик

стосується сировини, вирощування якої призводить до значного розширення використання земель з високим запасом вуглецю. Частка біопалив з такої сировини у виконанні цілей з ВДЕ на транспорті певної країни, по-перше, не може перевищувати рівня їх споживання в країні у 2019 р., по-друге, повинна скоротитися до 0% протягом періоду 31.12.2023-31.12.2030. Вказане обмеження не стосується РБП I покоління із сировини з низьким ризиком непрямої зміни землекористування. Більш того, зазначено, що використання таких біопалив має заохочуватися з метою декарбонізації економіки.

До рідких біопалив I покоління з низьким ризиком непрямої зміни землекористування відносяться біопалива, отримані з харчової/кормової сировини, що не конкурує з виробництвом продуктів харчування/кормів завдяки:

- Наявності надлишкового обсягу цієї сировини через значне підвищення врожайності сільськогосподарських культур в результаті росту ефективності аграрного виробництва.

- Отриманню цієї сировини на землях, що раніше не використовувалися для вирощування сільськогосподарських культур. При цьому повинні виконуватися критерії сталості, що стосуються невикористання певних категорій земель, у тому числі земель з високим рівнем біорізноманіття і з високим запасом вуглецю.

Підходи Єврокомісії до питань сталості та їх порівняння з поглядами європейських і міжнародних експертів

Для заліку у виконання цілей по ВДЕ на транспорті рідкі біопалива повинні відповідати критеріям сталості стосовно землекористування і вимогам щодо скорочення викидів ПГ. Єврокомісія має найбільш жорсткі підходи щодо питань сталості біопалив порівняно з поглядами деяких європейських та міжнародних експертів. Це можна продемонструвати на прикладі сталих авіаційних палив.

За підходом Міжнародної організації цивільної авіації, до САП відносяться палива, вироблені з відновлюваної сировини або відходів, що відповідають критеріям сталості методології оцінки викидів парникових газів CORSIA: скорочення викидів ПГ протягом життєвого циклу палива, принаймні, на 10% порівняно з нафтовим реактивним паливом, а також не використання біомаси з земель з високим запасом вуглецю як сировини для отримання палива. Крім того, САП є «паливом для заправки», тобто може змішуватися з традиційним і автоматично включатися в існуючі системи заправки в аеропортах.

За версією Міжнародної асоціації повітряного транспорту, САП має три ключові ознаки: його виробництво є сталим, тобто не порушує екологічного балансу і не виснажує природні ресурси; воно вироблено з сировини, що є альтернативною сирій нафті; воно має властивості реактивного палива, що відповідають технічним і сертифікаційним вимогам для використання у комерційних літаках.

Єврокомісія під САП розуміє наступні види «палива для заправки», які відповідають критеріям сталості та вимогам скорочення викидів ПГ згідно Директиви ЄС RED II [8]: просунуте біопаливо, отримане з лігноцелюлозної сировини та певних видів відходів згідно Частини А Додатку IX RED II; просунуте біопаливо, отримане з водоростей; біопаливо, вироблене з сировини з «високим потенціалом сталості» – використаної харчової олії та певних видів тваринних жирів згідно Частини В Додатку IX RED II; синтетичне авіаційне паливо, отримане шляхом перетворення електроенергії у рідину.

З цього переліку видно, що Європейська Комісія до САП не відносить біопалива I покоління, тобто отримані з сільськогосподарських культур, призначених для виробництва продуктів харчування і кормів. На практиці такі біопалива у більшості випадків не відповідають вимогам скорочення викидів ПГ згідно Директиви ЄС RED II – не менше 50%, 60% та 65% для установок з

виробництва транспортних біопалив, що почали роботу, відповідно, до 05.10.2015 включно, у період з 06.10.2015 по 31.12.2020 та з 01.01.2021 [7]. У порівнянні з підходом CORSIA до скорочення викидів ПГ від використання САП (принаймні, на 10% відносно нафтового реактивного палива), вимоги RED II є набагато жорсткішими.

Згідно Директиви RED II, рідкі біопалива, вироблені з олійних культур, відносяться до біопалив I покоління. Це не співпадає з поглядами деяких європейських та міжнародних експертів, які класифікують біопалива з нехарчових олійних культур (олійних енергорослин) як просунуті (табл. 2).

Позиція експертного співтовариства з даної проблеми видається розумною, але залишаються ще невирішені питання, які потребують подальшого аналізу та вивчення:

- Чи можна віднести до просунутих рідкі біопалива, вироблені з олійної енергорослини, яка теоретично може бути харчовою, але на практиці використовується, головним чином, як технічна?

- Чи можна віднести до просунутих рідкі біопалива, вироблені з будь-яких енергетичних рослин на сільськогосподарських землях, що не використовувалися протягом мінімум 10 років?

Ситуація в Україні

Останніми роками в Україні має місце виробництво біоетанолу у невеликих обсягах (зокрема, у 2019 р. – 88,1 тис. т н.е., у 2020 р. – 51,1 тис. т н.е.), а виробництво біодизельного палива відсутнє. Тим не менш, у період до 2030 р. планується помітне нарощування об'ємів споживання рідких моторних біопалив, у тому числі просунутих (II покоління) (табл. 3).

Наразі напрямок виробництва і споживання рідких моторних біопалив практично не розвивається в Україні. Серед основних бар'єрів можна зазначити наступні:

- Висока ставка акцизного податку (100 євро за 1000 л) на біодизель та його суміші, що не містять або містять менш як 70 мас. % нафти або нафтопродуктів, одержаних з бітумінозних порід (окрім випадку, коли замовником такого пального згідно з умовами договору є Міністерство оборони України); на бензини моторні із вмістом не менш як 5 мас. % біоетанолу або не менш як 5 мас. % етил-трет-бутилового етеру або їх суміші.

- Вимога щодо податкового векселя на повну ставку акцизу, необхідного при транспортуванні біоетанолу.

- Відсутні законодавчо закріпленої вимоги щодо обов'язкової частки біоетанолу у бензині та біодизелю у дизельному паливі.

- Відсутність експортного мита на ріпак.

Табл. 2. Підходи до класифікації рідких біопалив, вироблених з різних видів сировини

Вид сировини	Тип рідких біопалив (I покоління або просунуті)		
	Директива ЄС RED II [7]	Європейські експерти [13]	Позиція авторів
Лігноцелюозна: відходи с/г, лісового господарства, деревоподібні/трав'янисті енергорослини (сировина з частини А додатку IX RED II).	Просунуті Подвійне зарахування ¹⁾	Просунуті (II покоління)	Просунуті
Використана харчова олія, тваринні жири (сировина з частини В додатку IX RED II).	I покоління Подвійне зарахування ¹⁾	Просунуті (II покоління)	Просунуті
Олійні енергетичні рослини: харчові/нехарчові	I покоління ²⁾	Просунуті (II покоління). Тільки для нехарчових енергорослин	Просунуті. Тільки для нехарчових енергорослин
Енергорослини, вирощені на с/г землях, що не використовувалися протягом мінімум 10 років	Не виділено в окрему категорію, але можуть бути віднесені: - до категорії біопалив I покоління «з низьким ризиком непрямої зміни землекористування» ³⁾ або - до просунутих біопалив (для деревоподібних/ трав'янистих енергорослин).	Не виділено в окрему категорію	Просунуті

1) До виконання цілей ЄС з ВДЕ на транспорті: 14% у 2030 р., у тому числі просунутих рідких біопалив та біогазу з сировини із Частини А Додатку IX Директиви ЄС RED II – 3,5%.

2) Термін «олійні енергорослини» в Директиві відсутній; є тільки олійні с/г культури.

3) Згідно визначенню у п. (37) Ст. 2 Директиви ЄС RED II, якщо «невикористання протягом мінімум 10 років» підпадає під поняття «землі, що раніше не використовувалися для вирощування с/г культур».

Табл. 3. Споживання біоетанолу і біодизелю в Україні

Вид біопалива	Фактичні дані [9]							Прогноз згідно НПДВЕ 2030 [10]	
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030
Біоетанол, тис. т н.е.,	42,4	35,1	38,4	47,0	37,2	88,1	51,1	184 (37*)	238 (48*)
Біодизель, тис. т н.е.,	-	-	-	-	-	-	-	26 (5*)	87 (17*)

* У тому числі II покоління (з відходів та залишків).

- Відсутність вітчизняного виробництва метанолу; складності виконання вимог щодо поводження з метанолом.

- Відсутність системи збирання відпрацьованої харчової олії.

- Відсутність вітчизняної лабораторії для випробування всіх показників якості метилових естерів жирних кислот відповідно до ДСТУ 6081:2009 та ДСТУ EN 14214:2019.

Україна має великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії та біопалив, у тому числі моторних. За даними 2021 р., енергетичний потенціал біомаси складає майже 25 млн т н.е./рік, у т.ч. 49% – сільськогосподарські залишки (солома, стебла кукурудзи і соняшника, лушпиння соняшника та ін.), 30% – енергетичні рослини (верба, тополя, міскантус на 1 млн га – на тверде біопаливо, кукурудза на 1 млн га – на біогаз).

Аналіз структури потенціалу біомаси в Україні свідчить про великі обсяги лігноцелюлозної сировини – деревної біомаси різного походження, різноманітних сільськогосподарських залишків, деревоподібних та трав'янистих енергетичних рослин – загалом близько 20 млн т н.е./рік. Частина цієї сировини може бути спожита для отримання просунутих рідких біопалив. Згідно Дорожньої карти розвитку біоенергетики України до 2050 року, розробленої фахівцями Інституту технічної теплофізики НАН України у 2020 р., виробництво рідких біопалив II покоління може скласти від 30 тис. т н.е. у 2025 р. до 430 тис. т н.е. у 2050 р. [11].

Пропозиції по внесенню змін до Директиви ЄС RED II

Як було зазначено раніше, в Директиві ЄС RED II до рідких біопалив I покоління з низьким ризиком непрямой зміни землекористування віднесено біопалива, отримані з харчової/кормової сировини, що не конкурує з виробництвом продуктів харчування/кормів. Можливість виробництва РБП I покоління з надлишкового обсягу харчової/кормової сировини є актуальною опцією для умов України. Це пов'язано з тим, що Україна має великі площі сільськогосподарських земель і отриманих врожаїв з надлишком вистачає для забезпечення країни продуктами харчування і кормами для худоби. Крім того, в Україні є до 4 млн га незадіяних сільськогосподарських земель, тобто таких, що не використовуються для вирощування сільськогосподарських культур протягом багатьох років. На таких землях можна вирощувати енергетичні рослини для виробництва всіх видів біопалив – твердих, рідких, газоподібних.

Важливо зазначити, що умови України щодо загальних площ сільськогосподарських земель, у тому числі незадіяних під сільськогосподарське виробництво, суттєво відрізняються від умов країн ЄС. В останніх площі сільськогосподарських земель є доволі обмеженими, а можливості їх розширення практично відсутні, тому застосовуються жорсткі критерії сталості для недопущення конкуренції між отриманням біопалив та виробництвом продуктів харчування і кормів.

Вважаємо, що для України як країни з особливими умовами мають бути зроблені виключення в новій редакції Директиви ЄС RED II стосовно критеріїв сталості землекористування. За статистичними даними 2021 року [12], площа сільськогосподарських угідь в Україні складає 41,3 млн га (68,5% загальної площі країни), у тому числі рілля – 32,7 млн га (54%), з якої посівна площа – 28,6 млн га (47%). Пропонуємо внести до Директиви ЄС RED II правило, за яким країна з

надлишком площі рілля може використати до 1% площі рілля для вирощування сільськогосподарських культур з метою виробництва рідких біопалив I покоління, при чому ці біопалива не будуть підпадати під обмеження, зазначені в Директиві щодо зарахування РБП I покоління до виконання цілей з ВДЕ на транспорті.

Для України 1% площі рілля – це близько 300 тис. га. Якщо їх використати для вирощування кукурудзи на зерно (150 тис. га) та ріпаку (150 тис. га), це дасть можливість отримати орієнтовно 165 тис. т н.е./рік біоетанолу і 104 тис. т н.е./рік біодизелю.

Приклади виключень по певним питанням для окремих країн вже існують в Директиві ЄС RED II. Так, для Кіпру і Мальти встановлено спеціальне правило по розрахунку валового кінцевого споживання енергії національною авіацією як складової загального енергоспоживання. Через «периферичне» географічне розташування, частка енергоспоживання сектором авіації в цих країнах значно вище аналогічного середнього показника ЄС – у 3 і більше разів. При цьому, на даному рівні технічного розвитку авіація є одним з найскладніших секторів транспорту для впровадження комерційного споживання біопалив. Тому для Кіпру і Мальти частка національної авіації в загальному кінцевому енергоспоживанні обмежена величиною, що лише у 1,5 рази перевищує середній показник ЄС 2005 року.

Висновки та рекомендації для України

Україна має значний потенціал біомаси для виробництва рідких моторних біопалив, у тому числі просунутих (II покоління). Наразі розвитку даного напрямку перешкоджає низка бар'єрів, у тому числі відсутність законодавчо закріпленої вимоги щодо обов'язкової частки біоетанолу у бензині та біодизелю у дизельному паливі. У 2021-2022 рр. було прийнято за основу два законопроекти [14, 15], спрямовані на усунення деяких із зазначених бар'єрів, але їх подальше проходження зупинилося. Вважаємо за необхідне увести обов'язкову вимогу щодо певної частки використання біоетанолу та біодизелю на транспорті в Україні і визначити механізм, який забезпечить виконання цієї вимоги. Також рекомендуємо створити сприятливі умови для розвитку вітчизняного виробництва рідких моторних біопалив. Це може включати зниження акцизного податку, скасування вимоги щодо податкового векселя на повну ставку акцизу, необхідного при транспортуванні біоетанолу, введення експортного мита на ріпак та інші заходи.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Renewable Energy Market Update Outlook for 2021 and 2022*. IEA, 2022.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/18a6041d-bf13-4667-a4c2-8fc008974008/RenewableEnergyMarketUpdate-Outlookfor2021and2022.pdf>
2. *Report on global market supply 2020/2021*. UFOP, 2021.
https://www.ufop.de/files/7216/1649/5848/UFOP_SupplyReport_2020-2021_120321.pdf
3. *Renewable Energy in transport Barometer*. EurObserv'ER 2021.
<https://www.eurobserv-er.org/pdf/res-in-transport-barometer-2021/>
4. *Biofuels Annual Report*. USDA, 2022. <https://bit.ly/3P7sdDq>
5. *Statistics and Infographics*. ePURE – European Renewable Ethanol.
<https://www.epure.org/resources-statistics/statistics-infographics/>
6. *Report on the Achievement of the 2020 Renewable Energy Targets*. European Commission, COM(2022) 639 final, 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0639>
7. *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, 2018
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>
8. *ReFuelEU Aviation initiative*. Sustainable aviation fuels and the fit for 55 package. European Parliament, 2022. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI\(2022\)698900_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI(2022)698900_EN.pdf)
9. *Звіти про результати стимулювання та використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел, в Україні за 2014-2020 рр.* Держенергоефективності. <https://saee.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy>
10. *Проект Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року*. Держенергоефективності, 2022. <https://saee.gov.ua/uk/activity/normotvorcha-diyalnist>
11. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Баитовий А.І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020, т. 42, № 2, с. 60-67. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>
12. *Статистичний щорічник України за 2021 рік* / Державна служба статистики України, Збірник за редакцією І. Є. Вернера. – Київ, 2022. – 447 с.
13. S. Doliente, A. Narayan, J. Tapia et al. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components // Front. Energy Res., 8:110, 2020. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00110/full>
14. *Проект Закону* про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту (№ 3356-д від 05.11.2020).
<https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/4577>
15. *Проект Закону* про внесення змін до Податкового кодексу України та інших законодавчих актів України щодо справляння єдиного внеску та обліку спирту етилового денатурованого та продукції хімічного і технічного призначення (№7233 від 30.03.2022). <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/39324>

ANALYSIS OF PROSPECTS AND SUSTAINABILITY
ISSUES OF LIQUID MOTOR BIOFUELS
PRODUCTION IN THE EU AND IN UKRAINE

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, vul. Marii Kapnist, 2a,
Kyiv, 03057, Ukraine*<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.6>

The purpose of the work is to analyse prospects for the production and use of liquid biofuels in Ukraine and to suggest relevant recommendations for the development of this direction, taking into account sustainability issues. The transition to biofuels is one of the effective measures for decarbonization of transport, which undergoes this process with difficulty in comparison with other energy sectors. According to 2020 data, the share of renewable energy sources in the gross final energy consumption in the EU's transport sector is 10.2%. EU Directive RED II aims to increase this indicator to at least 14% in 2030, including the contribution of advanced biofuels and biogas produced from specified types of raw materials, at least to 3.5%. To be included in achieving the goals, motor biofuels must meet the sustainability criteria on land use and the requirements for reducing greenhouse gas emissions. The European Commission has the strictest approach to biofuels sustainability issues compared to the views of some European and international experts. In recent years, bioethanol has been produced only in small volumes in Ukraine, and there has been no production of biodiesel at all. Nevertheless, in the period until 2030, it is planned to significantly increase the consumption of motor biofuels, including advanced ones. Currently, the development of this direction in Ukraine is hindered by a number of barriers. It is recommended to create favourable conditions for the development of domestic production of motor biofuels. This may include a reduction in the excise tax, the abolition of compulsory tax bill for the full rate of excise duty when transporting bioethanol, the introduction of an export duty on rapeseed, and some other measures.

References 15, tables 3, figures 2.

Keywords: renewable energy sources, biofuels, advanced biofuels, biodiesel, bioethanol, sustainability criteria.1. *Renewable Energy Market Update Outlook for 2021 and 2022*. IEA, 2022.<https://iea.blob.core.windows.net/assets/18a6041d-bf13-4667-a4c2-8fc008974008/RenewableEnergyMarketUpdate-Outlookfor2021and2022.pdf>2. *Report on global market supply 2020/2021*. UFOP, 2021.https://www.ufop.de/files/7216/1649/5848/UFOP_SupplyReport_2020-2021__120321.pdf3. *Renewable Energy in transport Barometer*. EurObserv'ER 2021.<https://www.eurobserv-er.org/pdf/res-in-transport-barometer-2021/>4. *Biofuels Annual Report*. USDA, 2022. <https://bit.ly/3P7sdDq>5. *Statistics and Infographics*. ePURE – European Renewable Ethanol.<https://www.epure.org/resources-statistics/statistics-infographics/>6. *Report on the Achievement of the 2020 Renewable Energy Targets*. European Commission, COM(2022) 639 final, 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0639>7. *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, 2018<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>8. *ReFuelEU Aviation initiative*. Sustainable aviation fuels and the fit for 55 package. European Parliament, 2022. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI\(2022\)698900_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI(2022)698900_EN.pdf)9. *Zvity pro rezultaty stymulivannia ta vykorystannia enerhii, vyroblenoi z vidnovliuvanykh dzherel, v Ukraini za 2014-2020 rr.* [Reports on the results of stimulation and use of energy produced from renewable sources in Ukraine for 2014-2020.]. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (Ukr.) <https://saee.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy>10. *Proiekt Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku*. [Draft of National Renewable Energy Action Plan until 2030.]. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, 2022. (Ukr.) <https://saee.gov.ua/uk/activity/normotvorchadiyalnist>11. *Geletukha G., Zheliezna T., Bashtovyi A. Dorozhnia karta rozvytku bioenerhetyky Ukrainy do 2050 roku*. [Road map of bioenergy development in Ukraine until 2050.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 42, No. 2 (2020). – P. 60-67. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>12. *Statistichnij shorichnik Ukrayini za 2021 rik*. [Statistical Yearbook of Ukraine for 2021.]. State Statistics Service of Ukraine, Publication edited by I.E. Verner. – Kyiv, 2022. – 447 p. (Ukr.)

13. *S. Doliente, A. Narayan, J. Tapia et al. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components*//Front. Energy Res., 8:110, 2020. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00110/full>

14. *Proiekt Zakonu pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo oboviazkovosti vykorystannia ridkoho biopalyva (biokomponentiv) u haluzi transportu* [Draft Law on Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Mandatory Use of Liquid Biofuel (Biocomponents) in the Transport Industry.]. (No. 3356-d from November 5, 2020). (Ukr.)

<https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/4577>

15. *Proiekt Zakonu pro vnesennia zmin do Podatkovoho kodeksu Ukrainy ta inshykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo spravliannia yedynoho vnesku ta obliku spyrtu etylovoho denaturovanoho ta produktsii khimichnoho i tekhnichnoho pryznachennia* [Draft Law on Amendments to the Tax Code of Ukraine and other legislative acts of Ukraine on the single contribution and accounting of denatured ethyl alcohol and chemical and technical products.]. (No. 7233 from March 30, 2022). (Ukr.) <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/39324>

Отримано 15.08.2022

Received 15.08.2022

УДК 662.7

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ НА ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ

Драгнєв С.В., канд. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Гайдай О.І., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>

Проаналізовано основні види альтернативних палив для використання на водному транспорті з метою декарбонізації судноплавства. Визначено перспективні види альтернативних палив та енергоносіїв для впровадження в секторі водного транспорту України.

The main types of alternative fuels for use in waterborne transport with the aim of decarbonizing shipping have been analyzed. Prospective types of alternative fuels and energy carriers for implementing in Ukraine's waterborne transport sector have been identified.

Бібл. 12, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: декарбонізація, альтернативні палива, низьковуглецеві палива, відновлювані джерела енергії, біопалива, суднове паливо.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ГТЗ – гідротермальне зрідження;

ДМЕ – диметилловий естер;

ДП – дизельне паливо;

ЗНГ – зріджений нафтовий газ;

СПГ – скраплений природний газ;

FAME – метилові етери жирних кислот;

HVO – гідроочищена рослинна олія;

ІМО – Міжнародна морська організація;

MDO – суднове дизельне паливо;

MGO – морський газойль;

SVO – пряма рослинна олія.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю глобальної декарбонізації економіки, зокрема транспортного сектору. Ефективним заходом в даному напрямку є перехід на низьковуглецеві та відновлювані палива, у тому числі на водному транспорті – сегменті, що важко піддається декарбонізації. **Метою** роботи є аналіз перспектив використання альтернативних палив на водному транспорті та розробка відповідних рекомендацій для України. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Цілі з декарбонізації водного транспорту у світі та можливі заходи для їх досягнення

З огляду на глобальний курс декарбонізації економіки, сектор водного транспорту готується до переходу на нові технології та енергоносії, що матиме значний вплив на витрати, вартість активів та прибутковість. Судновласники вже відчувають збільшення тиску щодо скорочення викидів парникових газів від їхньої діяльності. У найближче десятиліття декарбонізацію в судноплаванні підштовхуватимуть три основні ключові чинники: правила та політики, доступ до інвесторів і капіталу, а також очікування вантажовласників і споживачів [1].

Міжнародна морська організація розробляє політики щодо скорочення викидів парникових газів для міжнародного судноплавства. Перші регулювання, зокрема, Індекс енергоефективності існуючого судна та Індикатор інтенсивності вуглецю набудуть чинності з 1 січня 2023 р. Одна з цілей цієї діяльності – до 2030 р. досягти зниження інтенсивності вуглецю всіх суден на 40% порівняно з рівнем 2008 р. Метою є скорочення викидів парникових газів за рахунок підвищення енергоефективності суден, а також впровадження нових технологій та палив з низьким або нульовим вмістом вуглецю. Хоча всі судна повинні відповідати мінімальним вимогам ІМО, комерційний тиск може підштовхнути судновласників до досягнення лідируючої позиції в області декарбонізації, оскільки очікується, що судноплавні компанії, що працюють із поганими показниками, будуть менш привабливими на ринку перевезень, а також матимуть проблеми з отриманням доступу до інвестицій. Доступні заходи щодо зменшення викидів парникових газів варіюються від легко досяжних операційних заходів до капіталомістких технічних рішень. Нові судна матимуть більше доступних опцій, ніж кораблі, які експлуатуються. В табл. 1 представлені доступні заходи декарбонізації судноплавства, із яких

найбільший потенціал скорочення викидів парникових газів має напрямок використання альтернативних палив та відновлюваної енергії.

Аналіз альтернативних палив на водному транспорті
Усі альтернативні види палива для водного транспорту стикаються з труднощами та перешкодами для їхнього використання, хоча складність подолання цих бар'єрів буде різною для різних видів палива. Типові ключові бар'єри включають високу вартість необхідних машин і обладнання, систем для зберігання палива на борту суден, необхідність у додатковому просторі для зберігання, низьку технічну зрілість, високу ціну на паливо, обмежену доступність палива, відсутність

глобальної інфраструктури бункрування (тобто заправки судна) та питання безпеки, зокрема, властивостей вогненебезпечності та вибухонебезпечності палив. На червень 2021 р. лише 0,5% суден у світі використовували альтернативні палива, але при цьому у 2021 р. 11,8% замовлень були на судна на альтернативному паливі. Із них 6,1% замовлень на судна на СПГ, 3,8% – на електричних акумуляторних батареях, 1,5% – на ЗНГ, 0,3% – на метанолі, 0,06% – на водні та 0,02% – на аміаку [1].

За своїми хімічними та фізичними характеристиками альтернативні види палива суттєво відрізняються від традиційних палив для водного транспорту (табл. 2). Особливу небезпечними є властивості, пов'язані з ризиком пожеж та вибухів.

Табл. 1. Можливі заходи для декарбонізації судноплавства та їх потенціал [1]

Напрямок	Заходи	Потенціал скорочення викидів парникових газів
Паливо та енергія	Використання альтернативних палив та ВДЕ: СПГ, ЗНГ, біопалива, метанол, аміак, водень, енергія навколишнього середовища, електроенергія.	до 100%
Заходи після використання	Уловлювання та зберігання вуглецю	> 30%
Логістика та дигіталізація	Зменшення швидкості судна, утилізація суден, розмір судна, альтернативні маршрути.	> 20%
Техніка	Удосконалення техніки, утилізація скидного тепла, зниження номінальних параметрів двигуна, гібридизація акумуляторних батарей.	5...20%
Гідродинаміка	Покриття корпусу, оптимізація форми корпусу, повітряне змащування, очищення	5...15%

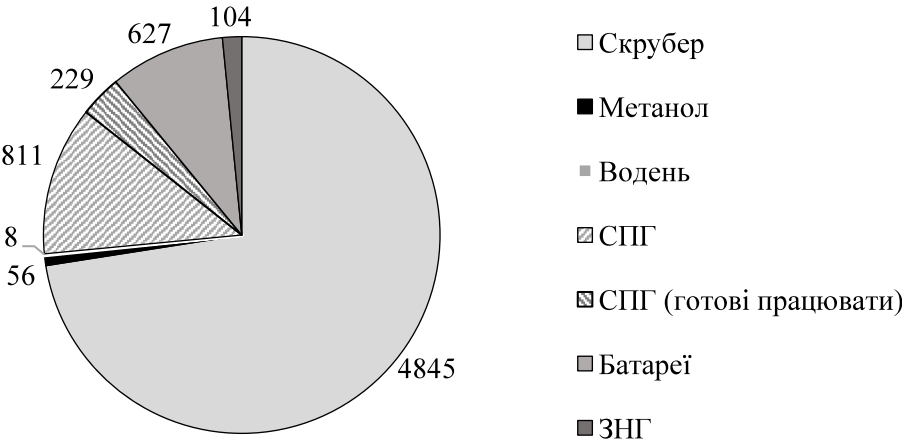


Рис. 1. Кількість суден у експлуатації та замовленні за видами альтернативних палив і використанням скрубєрів [2]

Наявність і доступність інфраструктури для постачання палив, їх зберігання та бункерування – важливий аспект для розвитку ринку альтернативних палив для водного транспорту. У багатьох портах вже є діючі термінали СПГ, метанолу та аміаку, які можна модернізувати для бункерування суден. Крім цього, будуються нові термінали. В Україні є діючий аміачний термінал у порту Південний із обсягом зберігання 120 тис. т, який може використовуватися і для перевантаження суден або барж із аміаком. Інформація щодо можливості прямого бункерування суден відсутня. Поблизу у Румунії наявний метанольний термінал у порту Констанца із обсягом зберігання понад 50 тис. т. У Болгарії у порту Русе на р. Дунай будується термінал СПГ для бункерування суден внутрішньої навігації із обсягом зберігання 1 тис. м³, що є частиною генерального плану СПГ для магістралі Рейн-Майн-Дунай.

Для переведення енергетичних установок суден на деякі альтернативні види палив, такі як, СПГ, метанол та аміак, необхідно провести складну і дорогу

модернізацію двигунів, їх паливної системи, встановити додаткові резервуари для палива, тощо. Виходячи з сучасних технологій, слід розрізняти суднопластво на короткі відстані та глибоководні довгі маршрути щодо застосовності та бар'єрів для різних видів палива. Глибоководні великі і потужні судна мають менше можливостей для вибору палив у порівнянні з сегментом перевезень на короткі відстані за постійними маршрутами, де можуть застосовуватися й малопоширені технології і палива, виготовлені з місцевої сировини, зокрема, біомаси. Розглянемо більш детально технології виробництва та використання найбільш перспективних видів альтернативних видів палива для водного транспорту.

Скrapлений природний газ

Останніми роками серед альтернативних видів палива для водного транспорту найбільше розповсюдження отримав скrapлений природний газ, який являє собою природний газ, очищений та переведений у рідкій стан за рахунок охолодження до температури мінус 162°C.

Табл.2. Характеристики традиційних та альтернативних палив для водного транспорту [3, 4]

Характеристики	Дизельне паливо	СПГ	Метан	Метанол	ЗНГ ⁴⁾	Водень
Молекулярна формула	$C_n H_{1,8n}$; $C_8 - C_{20}$	$C_n H_m$; 90-99% CH_4	CH_4	CH_3OH	C_3H_8 та C_4H_{10}	H_2
Вміст вуглецю, мас. %	86,88	близько 75	74,84	37,49		
Густина при 16°C, кг/м ³	833... 881	431... 4641)	422,51)	794,6	505	0,08
Температура кипіння при 101,3 кПа, °C ²⁾	163...399	-160 (-161)	-161,5	64,5	-42	-253
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	42,5	49	50	20	47	120
Нижча теплотворна здатність, ГДж/м ³	35	22		16		
Температура самозаймання, °C	257	580	537	464	457	585
Температура спалаху, °C ³⁾	52...96	-136		11	-60	
Цетанове число	>40	0		5		
Межі займистості, об. % у повітрі	1,0...5,0	4,2...16,0	1,4...7,6	6,72...36,5	2,1...9,6	4...59
Розчинність у воді	Ні		Ні	Повна		
Вміст сірки, %	Змінюється, <0,5 або <0,1	< 0,06	0	0		

1) Для метану/СПГ при температурі кипіння.

2) Для перерахунку кПа у рсі використовується множення на 0,145.

3) Найнижча температура, при якій паливо може випаровуватися з утворенням горючої суміші на повітрі.

4) На основі середнього складу.

СПГ займає близько 1/600 об'єму природного газу в газоподібному стані (за стандартних умов) і складається переважно з метану (CH_4) та з деякою кількістю етану (C_2H_6). СПГ використовується як дієвий спосіб для дотримання обмежень у районах контролю викидів на існуючих судах і планується для застосування на нових судах. Ключовою екологічною перевагою СПГ є скорочення викидів SOx , твердих частинок, NOx та CO_2 порівняно із традиційними нафтопродуктами. [5].

При використанні СПГ утворюються найменші викиди парникових газів серед викопних палив для водного транспорту (рис. 2). Можна досягнути і більшого скорочення парникових газів, якщо СПГ виробляти з відновлюваної сировини, наприклад, з біомаси шляхом її анаеробної ферментації у біогазовій установці з наступним очищенням біогазу до біометану – біо-СПГ.

Метанол, аміак, водень

Метанол (метиловий спирт) є гарною заміною бензину, використовується в сумішевих видах палива, а також може забезпечити хороший рівень продуктивності в дизельних двигунах. Для використання в дизельних двигунах необхідно подавати невелику кількість дизельного палива разом з метанолом або застосовувати покращувач запалювання. Також метанол використовують для виробництва біодизелю, метил-трет-бутилового етеру, диметилового етеру та у паливних елементах. У складі метанолу нема сірка, при його спалюванні викиди NOx утворюються у невеликій кількості, а викиди твердих частинок відсутні, тому це паливо вважається перспективним для водного транспорту. Однак, слід наголосити на токсичності метилового спирту.

Відновлюваний метанол можна виробляти двома шляхами. Біометанол отримують з біомаси, такої як відходи і побічні продукти лісового та

сільськогосподарського виробництва, біогаз зі звалищ, стічних вод, твердих побутових відходів, а також чорний луг целюлозно-паперової промисловості. «Зелений» е-метанол отримують з використанням CO_2 , що уловлюється з відновлюваних джерел (наприклад, використання біоенергетичних технологій із уловленням та зберіганням вуглецю і пряме уловлювання з повітря), та «зеленого» водню, тобто водню, виробленого з використанням відновлюваної електроенергії [7]. Наразі у світі виробляється менше 0,2 млн т/рік відновлюваного метанолу. При цьому як сировина, в основному, використовуються відходи та побічні продукти інших промислових процесів, що на даний момент забезпечує найкращий економічний ефект.

Аміак являє значний інтерес як потенційне паливо з нульовими викидами вуглецю для транспорту. За нормальних умов це безбарвний газ із різким задушливим запахом, легший за повітря і добре розчинний у воді. Порівняно з судовим паливом MGO, вміст енергії аміаку у рідкому стані становить менше половини за масою та приблизно 30% за об'ємом.

Аміак можна використовувати як судове паливо як у двигунах внутрішнього згоряння, так і в паливних елементах. Через високу температуру самозаймання аміак потребує вищого ступеня стиснення (35:1 і вище), ніж у типових дизельних двигунах (16-23:1). Важко сконструювати такий двигун, і тому для забезпечення більш стабільного горіння необхідно використовувати додаткове паливо з нижчою температурою самозаймання. Вважається, що двигуни з примусовим запалюванням на аміаку будуть використовуватися для невеликих суден, тоді як модифіковані двотактні (двопаливні) дизельні двигуни можуть підійти для великих кораблів. Спалювання аміаку або аміачних сумішей може призвести до

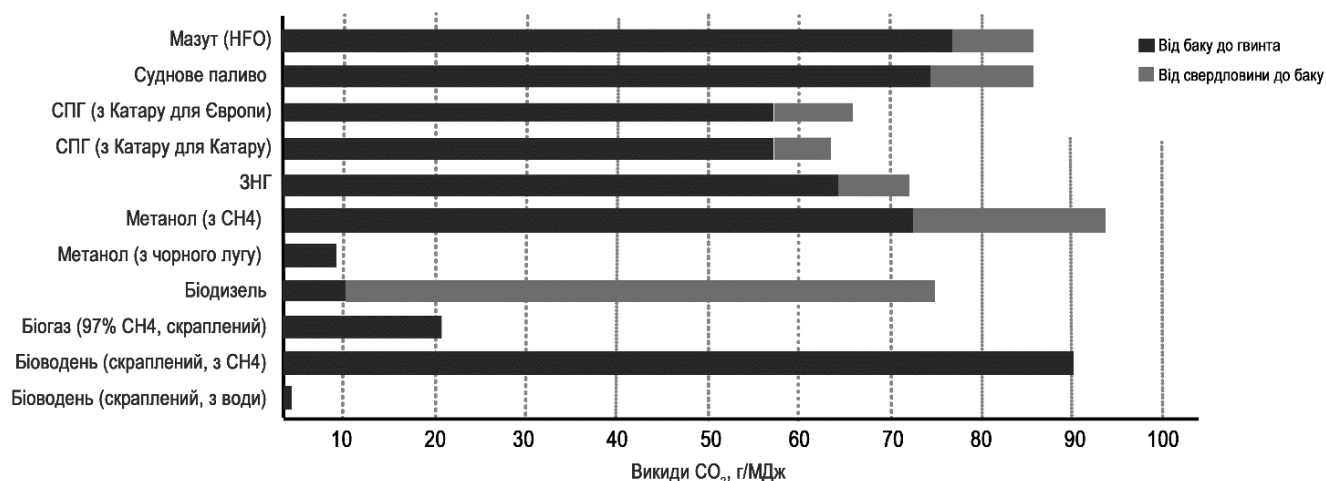


Рис. 2. Викиди CO_2 від традиційних та альтернативних палив на водному транспорті [6]

викидів оксидів азоту (NO_x), закису азоту (N_2O) і прямих викидів аміаку (NH_3). Але на сьогодні немає досвіду довгої експлуатації суднових двигунів на аміаку, тому недостатньо емпіричних даних щодо викидів від спалювання цього виду палива [8]. Очікується що комерційні двигуни на аміаку з'являться не раніше 2024 р.

Аміак, вироблений з природного газу, утворює такі ж викиди CO_2 як і суднове паливо MGO з низьким вмістом сірки (88 кг CO_2 /ГДж). Тому суттєве зменшення викидів парникових газів може бути досягнуто за умови виробництва аміаку із використанням відновлюваних джерел енергії [9].

Водень – безбарвний газ без запаху, нетоксичний. Для використання на судах його можна зберігати у вигляді кріогенної рідини, стисненого газу або хімічно зв'язаним. Зріджувати водень можна при температурах до мінус 240°C , підвищуючи тиск до «критичного» – 13 бар. Щільність енергії на масу водню, із врахуванням нижчої теплоти згоряння 120 МДж/кг, приблизно в три рази перевищує щільність енергії мазуту. При цьому об'ємна щільність зрідженого водню (71 кг/м^3) становить лише 7% від показника мазуту. Це призводить до приблизно п'ятикратного збільшення об'єму порівняно з тією ж енергією, що зберігається у мазуті. При зберіганні водню у вигляді стисненого газу його

об'єм приблизно в 10...15 разів (залежно від тиску) перевищує об'єм такої ж кількості енергії у мазуті [6]. Інфраструктура розподілу та бункерування водню для водного транспорту поки що відсутня.

Світове виробництво водню становить понад 50 млн т/рік. Його можна виробляти шляхом риформінгу природного газу (наразі найпоширеніший метод, при уловлюванні утвореного вуглекислого газу можна досягти нульових викидів CO_2) або через електроліз води (при використанні відновлюваної електроенергії отримується «зелений» водень). Хоча паливні елементи вважаються ключовою технологією для використання водню, також розглядаються й інші варіанти, зокрема, газові турбіни або двигуни внутрішнього згоряння в автономній роботі або в системах, що включають і паливні елементи. Очікується, що додаткові капітальні витрати звичайних перетворювачів енергії, таких як поршневі двигуни, будуть подібними до двигунів, що працюють на СПГ. Резервуари для зберігання зрідженого водню на судах будуть дорожче, ніж резервуари для СПГ, через нижчу температуру зберігання і вищу якість ізоляції. Витрати на інше обладнання (наприклад, труби, вентиляцію, теплообмінники, насоси) будуть порівнянними з системами СПГ [6].

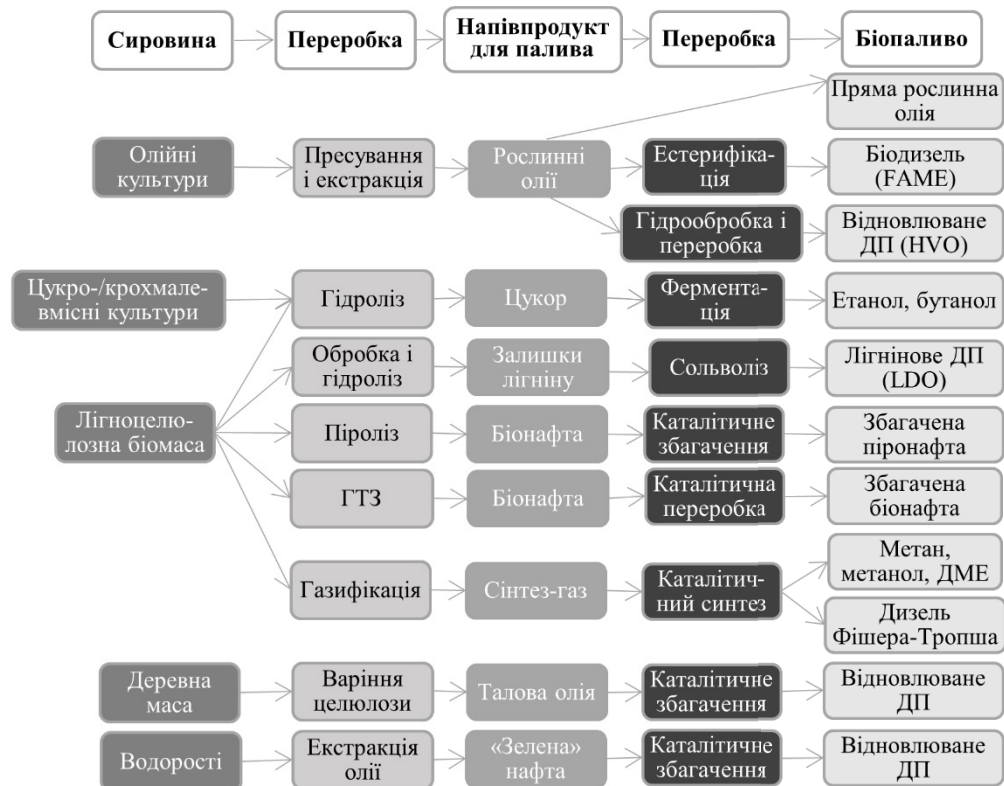


Рис. 3. Напрямки конверсії сировини у біопалива для водного транспорту [10]

Біопалива

Біопаливо для потреб транспорту отримують з первинної біомаси або залишків біомаси, які перетворюють на рідке або газоподібне паливо. Існує велика різноманітність процесів для виробництва традиційного (першого покоління) і вдосконаленого (другого і третього покоління) біопалива, що включає різні види сировини (олії, цукро-/крохмалевмісна біомаса, лігноцелюозна біомаса, деревна маса, водорості та ін.) та різні технології конверсії (естерифікація, гідрообробка, ферментація, сольволиз, термохімічні і каталітичні перетворення) (рис. 3). В табл. 3 наведено перелік основних властивостей біопалив для водного транспорту.

З олійної сировини виробляють три основних види біопалива: пряма (тобто необроблена) рослинна олія (SVO), біодизель (FAME) та відновлюване дизельне паливо (HVO), що використовуються як заміник дизельного палива або як компонент сумішевого палива. Технології виробництва SVO, FAME та HVO відпрацьовані та комерційно доступні. Пряма рослинна олія – олія, видобута з насіння олійних культур, що використовується як паливо без обробки. Дослідження показали, що SVO може бути застосована для заміни мазуту у двигунах з низькою частотою обертання. Слід відзначити, що тривале використання SVO призводить до надмірного зносу деталей двигуна. Крім цього це

біопаливом втрачає стабільність протягом тривалого зберігання, але додавання антиоксидантів може покращити ефективність тривалого зберігання.

Більш широко застосовується переробка олій у процесі естерифікації у метилові естери жирних кислот (FAME), які ще називають біодизелем. Окрім SVO, FAME також можна виробляти з використаної харчової олії та тваринних жирів. Біодизель має меншу в'язкість, ніж олії та характеризується хорошими змащувальними властивостями. FAME більше підходить для використання в суднових двигунах і може використовуватися для заміни MDO або MGO. Завдяки швидкому біорозкладанню, розливи біодизелю не спричиняють проблем для навколишнього середовища. Теоретично можливо використовувати суднові дизельні двигуни на 100% біодизельному паливі, але це вимагає певних налаштувань двигуна та його сертифікації, тому частіше FAME використовується у сумішевих паливах [12]. Хоча біодизель являє технічно можливу заміну для MDO та MGO, доступність олійної сировини та питання її сталості створюють труднощі для забезпечення потреб водного транспорту у такому паливі.

Модернізація суднових двигунів для споживання нових видів палива потребує значних ресурсів та коштів. З іншої сторони, судовласники будуть готові переходити на нові палива, тільки якщо постачання палива гарантується протягом усього терміну служ-

Табл. 3. Основні характеристики обраних видів біопалива для водного транспорту [11]

Показник	Біодизель	Відновлюване ДП	Дизель Фішера-Тропша	Біонафта швидкого піролізу з деревини	Збагачена біонафта	Біонафта ГТЗ з деревини
Питома вага	0,88	0,78	0,765	1,1...1,3	0,84	1,1
Кінематична в'язкість при 40°C, сСт	4...6	2...4	2	40...100		
Цетанове число	47...65	>70	>70			
Змащувальні властивості, мкм		650	371			
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	37,2	44,1	43	16		≈32
Температура помутніння, °C	-3...15	-5...-34	-18			
Температура застигання, °C	-5...10			-9...-36		
Вміст води, мас. %	0	0	0	20...35	0,1	8
Вміст кисню, мас. %	11	0	0	34...45	0,5	10...13
Вміст сірки, мас.	<0,0015	<0,0005	<0,1	0...0,05	<0,005	0

би їхнього суднового двигуна. Таким чином, якби нові види палива могли бути функціонально еквівалентними вже існуючим, вони були б повністю сумісні з існуючою паливною інфраструктурою без необхідності значних інвестицій у модифікацію інфраструктури. Для сумісності з існуючою нафтовою інфраструктурою тваринні жири і рослинні олії повинні пройти етап гідрообробки для перетворення в безкисневе вуглеводневе біопаливо. Такою альтернативою дизельному паливу, виготовленому з олійних культур, є гідроочищена рослинна олія (HVO, або відновлюване дизельне паливо), в якій рослинні олії або тваринні жири проходять термохімічну обробку воднем. HVO можна використовувати як пряму заміну дизельному паливу, оскільки воно є більш стабільним, ніж FAME, завдяки низькому вмісту кисню. Для виробництва HVO можна використовувати технологію гідроочищення існуючих нафтопереробних заводів. HVO пройшло випробування на суднових дизельних двигунах, воно сумісне з існуючою паливною інфраструктурою.

Пряма заміна морського газойлю можлива за умови досягнення достатніх обсягів виробництва біопалива. Але навіть у сумішевому паливі біопаливо забезпечує зменшення викидів твердих часток та CO_2 . Слід відзначити, що для успішної реалізації проекту із заміщення викопних палив представники заводу-виробника суднових двигунів повинні підтвердити сумісність двигунів із біопаливами та обов'язкові умови для їх надійної експлуатації.

Біогаз, отриманий шляхом анаеробного бродіння, потенційно є сировиною для виробництва зрідженого біогазу. Єдиною технічною вимогою для цього є збагачення біогазу до біометану, зокрема, шляхом видалення CO_2 . Цей процес комерційно використовується у біометанових установках, які підключені до газових мереж. У подальшому біогаз може бути зріджений за технологією зрідження природного газу.

Отже, найбільш перспективними біопаливами для суден є дизельне біопаливо (наприклад, гідроочищена рослинна олія, метилові естери жирних кислот, паливо «біомаса в рідину») та зріджений біогаз, який в основному складається з метану. Біодизель, HVO і паливо «біомаса в рідину» найбільш підходять для заміни MDO/MGO, зріджений біогаз – для заміни СПГ, пряма рослинна олія – для заміни мазуту [6].

Висновки та рекомендації для України

З точки зору застосування альтернативних видів палива на водному транспорті, треба виділити перевезення на короткі відстані та глибоководні маршрути.

У першому випадку судна зазвичай працюють в обмежених географічних зонах на відносно коротких маршрутах із частими заходами в порти. Через порівняно низьку потребу в енергії, ці судна можуть бути гарними кандидатами для випробування нових видів палива, що характеризується високими витратами на енергоконверсію або зберігання. Глибоководне судноплавство включає великі океанські судна, які здійснюють довгі маршрути, часто без регулярного розкладу. Ці судна потребують використання палива, яке доступне у всьому світі. Енергоносії, що приводить у рух судно, повинен мати достатньо високу щільність енергії, щоб максимізувати доступний вантажний простір. Для цих суден СПГ може бути життєздатним варіантом, коли відповідна інфраструктура бункерування стане доступною в усьому світі. Біопаливо, метанол і зріджений нафтовий газ також можуть бути життєздатним вибором за умови, що вони будуть доступні в необхідних обсягах і відповідного рівня якості.

При визначенні перспективних альтернативних палив для водного транспорту для умов України розглянуто і враховано наступні аспекти: рівень розвитку технології та її складність; сумісність з існуючими двигунами, паливною системою суден та інфраструктурою бункерування; наявність/доступність сировинної та ресурсної бази; об'ємний енерговміст, стандартизація, ціна, скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу палива (енергоносія).

За результатами порівняльного аналізу та оцінки, найбільш перспективними для водного транспорту України вбачаються наступні альтернативні палива: біометан, який може використовуватися у стисненому або скрапленому вигляді; біодизель (FAME) та гідроочищена рослинна олія (HVO); скраплений природний газ, а також застосування електричних силових установок з акумуляторними батареями. Розвиток кожного з цих напрямків потребує подальшого вивчення із проведенням науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *DNV Maritime forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2021.*
<https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050-download.html>
2. *DNV Statistics.* <https://afi.dnv.com/Statistics>
3. *Karin Andersson, Carlos Márquez Salazar. Methanol as a marine fuel report, FCBI Energy, 2015.*
<https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>

4. *DNV GL Strategic research & innovation position paper. The fuel trilemma: Next generation of marine fuels*, 2015.
<https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/06/DNV-GL-Position-Paper-on-Fuel-Trilemma.pdf>
5. *Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping* – IMO, 2016. <https://bit.ly/3BZFJo6>
6. *DNV GL – Maritime. Assessment of selected alternative fuels and technologies*. 2019.
<https://www.dnv.com/maritime/publications/alternative-fuel-assessment-download.html>
7. *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. IRENA, 2021 <https://bit.ly/3bLg3ka>
8. *Martin Cames, Nora Wissner, Jürgen Sutter. Ammonia as a marine fuel. Risks and perspectives*. Öko-Institut e.V., 2021. <https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-study-ammonia-marine-fuel.pdf>
9. *DNV GL – Maritime. Ammonia as a marine fuel*. White paper, 2020.
<https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>
10. *Biofuels for the marine shipping sector*. IEA Bioenergy, 2017. <https://bit.ly/3pei7o4>
11. *Mike Kass et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
12. *Progress towards biofuels for marine shipping. Status and identification of barriers for utilization of advanced biofuels in the marine sector*. IEA Bioenergy: Task 39, 2021. <https://bit.ly/3bKIoHx>

PROSPECT FOR THE USE OF BIOFUELS IN WATERBORNE TRANSPORT

Drahniev S.V., Zheliezna T.A., Haidai O.I.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>

The purpose of the work is to analyze prospects for the use of alternative fuels in waterborne transport and to develop relevant recommendations for Ukraine. An effective measure of decarbonization of the global economy, which is an urgent issue today, is the transition to low-carbon and renewable fuels. From the point of view of using alternative fuels in waterborne transport, it is necessary to distinguish the short-distance transportation and deep-sea routes. In the first case, ships usually operate in limited geographical areas on relatively short routes with frequent port calls. Such vessels are often good candidates for testing new types of fuel (energy carrier) characterized by high energy conversion or storage costs. Deep-sea shipping requires the use of fuel (energy carrier), which is available all over the world and has a sufficiently high energy density. When determining promising alternative fuels for Ukraine's waterborne transport, the following aspects have been taken into account: the level of technology development and its complexity; compatibility with existing engines, vessel fuel system and bunkering infrastructure; availability/accessibility of raw material and resource base; volumetric energy content, standardization, price, and reduction of greenhouse gas emissions during the life cycle of the fuel. According to the results of comparative analysis and assessment, the following alternative fuels are considered the most promising for Ukraine's waterborne transport: biomethane (compressed or liquefied), biodiesel and hydrotreated vegetable oil, liquefied natural gas, as well as electric power installations with accumulator batteries. The development of each of these directions requires further study with conducting research and development activity.

References 12, tables 3, figures 3.

Keywords: decarbonization, alternative fuels, low-carbon fuels, renewable energy sources, biofuels, vessel fuels.

1. *DNV Maritime forecast to 2050*. Energy Transition Outlook 2021. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050-download.html>
2. *DNV Statistics*. <https://afi.dnv.com/Statistics>
3. Karin Andersson, Carlos Márquez Salazar. Methanol as a marine fuel report, FCBI Energy, 2015. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
4. *DNV GL Strategic research & innovation position paper*. The fuel trilemma: Next generation of marine fuels, 2015. <https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/06/DNV-GL-Position-Paper-on-Fuel-Trilemma.pdf>
5. *Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping* – IMO, 2016. <https://bit.ly/3BZFJo6>
6. *DNV GL – Maritime*. Assessment of selected alternative fuels and technologies. 2019. <https://www.dnv.com/maritime/publications/alternative-fuel-assessment-download.html>
7. *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. IRENA, 2021 <https://bit.ly/3bLg3ka>
8. Martin Cames, Nora Wissner, Jürgen Sutter. Ammonia as a marine fuel. Risks and perspectives. Oeko-Institut e.V., 2021. <https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-study-ammonia-marine-fuel.pdf>
9. *DNV GL – Maritime*. Ammonia as a marine fuel. White paper, 2020. <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>
10. *Biofuels for the marine shipping sector*. IEA Bioenergy, 2017. <https://bit.ly/3pei7o4>
11. Mike Kass et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
12. *Progress towards biofuels for marine shipping*. Status and identification of barriers for utilization of advanced biofuels in the marine sector. IEA Bioenergy: Task 39, 2021. <https://bit.ly/3bKIoHx>

Отримано 15.08.2022

Received 15.08.2022

УДК 620.92

ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>

Наведено інформацію про основні технології збагачення біогазу до якості біометану, нові напрямки, що досліджуються, основні техніко-економічні показники технологій, що досягли комерційного рівня застосування. Проведено порівняння переваг та недоліків різних технологій та зроблено висновки щодо суттєвих умов при їх виборі.

Information on the main technologies of biogas upgrading, new areas under research, the main technical and economic indicators of commercially applied technologies are provided. A comparison of the advantages and disadvantages of various technologies was provided, and conclusions were made regarding the essential conditions for their selection.

Бібл. 23, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: біогаз, біометан, технології очищення біогазу, видалення CO₂.

Актуальність роботи обумовлена розширенням можливостей застосування біометану та зростанням зацікавленості виробників біогазу у впровадженні технологій його збагачення до якості біометану.

Метою даної роботи є огляд особливостей основних технологій збагачення біогазу, їх техніко-економічних показників, порівняння їх сильних та слабких сторін.

Методи дослідження включають аналіз наукових та інших публікацій, проведення оцінок та розрахунків.

Результати дослідження

Збагачення біогазу до якості природного газу в Україні стає все більш актуальним напрямком його застосування, що дозволяє не тільки подавати отриманий біометан в мережу природного газу, але й використання на транспорті у стисненому чи зрідженому вигляді чи в перспективі експортувати його в країни Європи. До 2030 року виробництво біометану в Україні може досягти 1 млрд м³ на рік [1], і зараз у власників біогазових станцій зростає зацікавленість у такому виробництві.

Як видно з даних табл. 1, найбільш вагомою складовою, що відрізняє склад біогазу від складу природного газу чи біометану, є вміст вуглекислого газу.

Крім вуглекислого газу, біогаз містить ще ряд складових, що мають максимально вилучатись при очищенні через їх негативний екологічний вплив чи вплив на споживчі якості біометану, зокрема:

- вода (H₂O), що сприяє корозії шляхом утворення кислотних сполук, а також може пошкодити обладнання при конденсації чи замерзанні при низьких температурах;

- сірководень (H₂S), що є токсичним газом та утворює ще більш токсичні сполуки при спалюванні, може детонувати при спалюванні в ДВЗ, сприяє корозії

обладнання, отруює каталізатори та адсорбенти на подальших технологічних стадіях та при кінцевому використанні;

- силосани, що утворюють оксид кремнію і мікрокристалічний кварц при спалюванні, які потім відкладаються на головках циліндрів двигунів, клапанах, свічках запалювання, посилюючи абразивний знос обладнання.

- аміак (NH₃), що є токсичним газом та створює токсичні сполуки при спалюванні, сприяє корозії обладнання;

- кисень - може спричиняти займання при певних концентраціях;

- леткі органічні сполуки (надалі - ЛОС), що є канцерогенними та токсичними, утворюють діоксини та фурани, справляють корозійний вплив на двигуни внутрішнього згоряння, руйнують резину і пластики.

На рис.1 автором узагальнено та схематично показано основні матеріальні потоки та супутні продукти, що можуть виникати в процесі збагачення біогазу до біометану та його подачі споживачам.

Вилучення вуглекислого газу є основною стадією збагачення біогазу (позначене на рис.1 як основне очищення). Для кожного методу основного очищення біогазу деякі з його компонентів можуть бути шкідливими для процесу, тому їх необхідно видалити перед основним очищенням. Також можуть бути обмеження щодо вмісту цих сполук у очищеному біометані. Тоді послідовність їх видалення залежить від того, чи відокремлюються вони під час очищення біогазу разом із CO₂, чи попадають в очищений продукт. Попереднє очищення біогазу застосовують для вилучення води, сірководню та силосанів. Після збагачення біогазу,

Табл. 1. Порівняння типового складу біогазу з біогазової установки та вимог до складу природного газу та біометану

Склад та інші характеристики	Біогаз з відходів сільського господарства [2]	«Усереднений» біогаз [2, 3]	Вимоги Кодексу газотранспортної системи (Україна) [4]	Вимоги до якості біометану, що передається до газорозподільної мережі [5]
метан (CH_4), %об.	50-80	50-75	>90	> 95
вуглекислий газ (CO_2), %об.	19-50	25-45	< 2	< 2,5
вода (H_2O), %об.	<6	2-7	-	-
азот (N_2), %об.	0-1	1-5	< 5	< 5
кисень (O_2), %об.	0-1	<2	< 0,2	< 1
водень (H_2), %об.	0-2	0-3	-	< 0,5
сірководень (H_2S), ppm	2160-10000	0,1-0,5%	< 6 мг/м ³	< 5 мг/м ³
амоній (NH_3), ppm	50-144	<1	-	< 10 мг/м ³
моноксид вуглецю (CO), %об.	0-1	0-0,3%	-	-
загальний хлор (Cl) мг/м ³	-	-	-	< 1,5 мг/м ³ (F, Cl)
силоксани, %об.	сліди	-	-	< 1 мг/м ³
Нижча теплота згоряння, МДж/м ³	20,5-23 [6]	-	32,66-34,54 (при 20-25 °C)	-

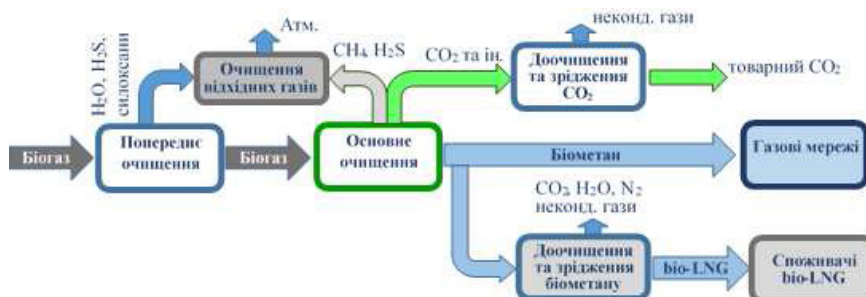


Рис. 1. Основні матеріальні потоки та супутні продукти процесів очищення біогазу до біометану та його подачі споживачам

залежно від технічних вимог операторів газових мереж, може знадобитись корекція складу отриманого біометану по температурі точки роси чи теплотворній здатності, а також одоризація. Також важливою стадією є очищення відхідних газів системи очищення біогазу, що можуть містити метан та інші хімічні сполуки.

Процеси основного очищення за фізичними принципами їх реалізації можна умовно розділити на адсорбційні, абсорбційні, мембранні, криогенні та біологічні. Класифікацію цих процесів, узагальнену автором на основі [7, 8, 9] показано на рис.2. Найбільш розповсюдженими технологіями, що досягли комерційного рівня, є наступні [2, 10, 11]:

1. Адсорбція зі зміною тиску (надалі- “pressure swing adsorption”, PSA).
2. Абсорбція водою (водяний скруббер, надалі- “high pressure water scrubber”, HPWS).
3. Фізична абсорбція органічними сорбентами (органічний фізичний скруббер, надалі- “physical scrubber”, PS).
4. Хімічна абсорбція (амінний скруббер, надалі- “chemical scrubber”, CS).
5. Мембранна сепарація (надалі- “membrane separation”, MS).
6. Криогенна сепарація (надалі- “cryogenic separation”, CrS).

Ці технології відмічені темнішим кольором на Рис. 2.

Адсорбція зі зміною тиску (PSA) [11, 12, 13]

PSA – це періодичний процес із використанням кількох колон, заповнених адсорбентом, що працюють паралельно під тиском 0,4-1,0 МПа. Як адсорбент зазвичай застосовують активоване вугілля або молекулярні сита. Процес очищення полягає в розділенні молекул газу на основі їх молекулярної маси та розміру – CO_2 , H_2O , O_2 і N_2 поглинаються адсорбентом, в той час як метан збирається у верхній частині адсорбційної колони під низьким тиском. Процес адсорбції є оборотним, і CO_2 видаляється під час циклу регенерації, що відбувається при зниженні тиску або, в деяких варіантах, при зміні температури. Коли адсорбуючий матеріал в одній посудині насичується поглинутими газами, потік необробленого газу перемикається на іншу колону, в якій адсорбент був регенований. Під час регенерації тиск знижується в кілька етапів, при цьому адсорбовані сполуки видаляються та десорбуються із середовища в окремому газовому потоці. Газ, десорбований під час першого та другого падіння тиску, може бути повернутий на вхід необробленого газу, оскільки він міститиме деяку кількість метану, який був адсорбований разом із вуглекислим газом. Газ, десорбований на наступному етапі зниження тиску, або направляється до наступної колони, або, якщо він майже вільний від метану, видаляється в атмосферу. Невелика кількість потоку очищеного метану використовується для продувки кожної колони та підготовки її до нового циклу. Оскільки адсорбент поглинає H_2S необоротно, цей газ вважається токсичною домішкою для цього процесу, і має бути видалений на стадії попередньої обробки. Суттєвим недоліком процесу PSA є необхідність додаткової очистки відхідних газів, щоб запобігти викидам у навколишнє середовище.

Різновидами реалізації при PSA є наступні [8, 14]:

– адсорбція зі зміною вакууму (VSA), яка відрізняється тим, що процес регенерації адсорбенту відбувається при тиску нижче атмосферного;

– адсорбція зі зміною температури (TSA), при якій для регенерації адсорбенту через колону пропускається нагрітий газ;

– адсорбція зі зміною температури електро-нагріванням (ESA) є модифікацією процесу TSA, при якій для регенерації адсорбенту застосовується електричне нагрівання колони;

– адсорбція з мікрохвильовою регенерацією (MR) використовує електромагнітну енергію, яка безпосередньо перетворюється на теплову енергію в шарі адсорбенту, без застосування звичайних процесів теплообміну.

Абсорбція водою (водяний скруббер, HPWS) [11, 12, 13].

У водяному скруббері використовується властивість вуглекислого газу набагато краще розчинятись у воді, ніж метан, причому цей ефект підвищується при більшому тиску. Установка складається з трьох основних елементів – абсорбційної колони, флеш-колони та десорбційної колони. В абсорбційній колоні, заповненій шаром пористого інертного матеріалу, необроблений газ, що подається під тиском 0,6-1,0 МПа, взаємодіє з водою в протитечії, в результаті вуглекислий газ та ряд інших домішок розчиняються у воді. Далі вода подається у флешколону, де тиск менший (0,25-0,35 МПа). В результаті з води виділяється частина розчинених газів, що повертаються на вхід необробленого газу. Близько 80% обсягу цих газів становить метан. Далі вода потрапляє в десорбційну колону, де вона в шарі пористого інертного матеріалу в протитечії продувається повітрям при ще нижчому тиску, звільняючись від CO_2 та H_2S , після чого подається знову в абсорбційну колону [12].

Фізична абсорбція органічними сорбентами (органічний фізичний скруббер, PS) [11, 12, 13].

В цьому методі вуглекислий газ з біогазу поглинається органічними розчинниками, що можуть вибірково вловлювати CO_2 без будь-яких хімічних реакцій. Органічними розчинниками, які зазвичай ви-

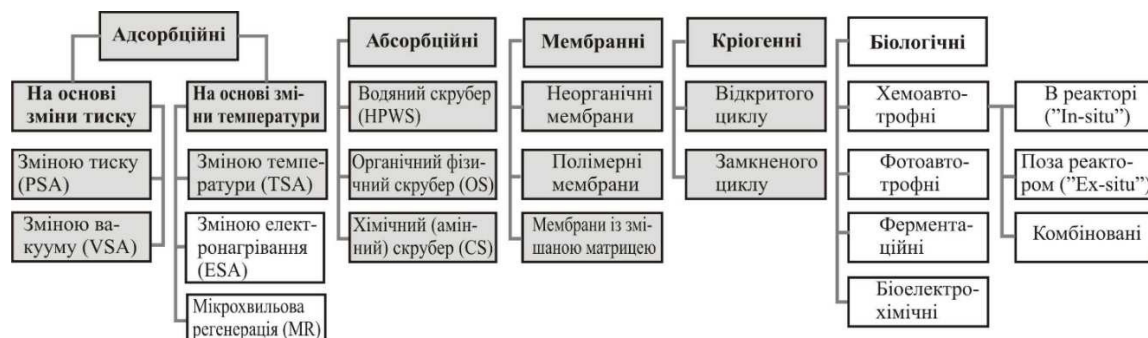


Рис. 2. Основні методи збагачення біогазу до біометану

користовуються для поглинання CO_2 і H_2S з біогазу, є поліетиленгліколеві ефіри (PEG), особливо Genosorb® і Selexol®, метанол і N-метилпіролідон [14]. Розчинність CO_2 в органічних розчинниках вища, ніж у воді. Наприклад, PEG можуть поглинати в п'ять разів більше CO_2 порівняно з водою. За апаратурним оформленням процес схожий на водяний скруббер. Певна відмінність полягає в тому, що процес абсорбції проводять при меншому тиску – 0,7-0,8 МПа, а також, органічний розчинник перед подачею в десорбційну колонку має бути нагрітий до температури 40-80 °С, для чого застосовують скидне тепло від різних процесів, наприклад, компресорів чи установок термічного окислення відхідних газів. Завдяки вищій абсорбційній здатності органічних розчинників, їх кількість в процесі значно нижча, ніж кількість води, що означає менші витрати на перекачування. Цей процес також підходить для видалення слідів таких речовин як N_2 , H_2S , O_2 і H_2O , хоча для видалення H_2S рекомендується попереднє очищення.

Хімічна абсорбція (амінний скруббер, CS) [11, 12, 13].

Основна особливість цієї технології полягає у використанні реагенту, який хімічно зв'язується з молекулами CO_2 , видаляючи їх з газу. Найчастіше для цього використовують водний розчин амінів. Для видалення вуглекислого газу та сірководню використовують метилдіетаноламін (MDEA), діетаноламін (DEA) і моноетаноламін (MEA). Найпоширенішою амінною системою на даний час є суміш MDEA та піперазину (PZ), яку часто називають активованою MDEA (aMDEA).

Установка складається з двох колон – абсорбера та десорбера. Необроблений біогаз вводиться в абсорбційну колонку під тиском 0,1–0,2 МПа. Розчин аміну вводиться у верхню частину абсорбційної колони, і тече в напрямку, протилежному руху біогазу. Абсорбційні колони можуть мати різну конструкцію та принцип дії – насадкові, плівкові, барботажні, розпилювальні, мембранні [15]. Температура водного розчину амінів в колоні підвищується від 20-40 °С до 45-65 °С за рахунок екзотермічної реакції з CO_2 . Здатність розчину аміну до поглинання CO_2 також зростає з температурою через більш високу швидкість реакції. Водний розчин аміну, насичений CO_2 і H_2S , виходить з абсорбційної колони знизу, проходить через теплообмінник і надходить у колонку десорбера. У колонку-десорбер подається тепло від ребойлера, розміщеного в низу колони, що призводить до підвищення температури до 120–150 °С і тиску до 0,15–0,3 МПа. Це сприяє розриву хімічних зв'язків між відпрацьованим розчином аміну та CO_2 , та призводить

до регенерації розчину аміну. Основним недоліком цього способу є суттєва кількість теплоти, необхідна для регенерації розчину аміну.

Мембранна сепарація (MS) [11, 12, 13].

Мембрана – це щільний фільтр, який може розділяти компоненти в газі або рідині на молекулярному рівні. У мембранних процесах розділення газу рушійною силою для розділення є різниця парціального тиску газу через мембранний бар'єр. Окремі компоненти можна відокремити, враховуючи їхню різну проникність через пористий мембранний матеріал або різну розчинність і дифузійну здатність через неперфорований щільний мембранний матеріал [15]. Процес мембранного очищення полягає в тому, що біогаз стискають до 0,6-2,5 МПа та пропускають через мембранний сепаратор, який видаляє CO_2 . Очищений біогаз виходить із сепаратора на стороні високого тиску, а домішки видаляються на стороні низького тиску. Для очищення біогазу зазвичай використовуються мембрани з полімерів або неорганічних матеріалів. Полімерні мембрани є найпоширенішими, оскільки вони недорогі, прості у виготовленні та стабільні при високому тиску. Багатоступеневі мембранні системи можуть виробляти біометан із вмістом CH_4 понад 96%. Очищення біогазу за допомогою мембранної сепарації – відносно простий процес, що не висуває високих експлуатаційних вимог, а найбільшим недоліком є високі початкові інвестиційні витрати. Такі домішки, як водяна пара та сірководень, необхідно видалити з біогазу перед подачею на мембрани.

Кріогенна сепарація (CrS) [11, 12, 13].

Принцип кріогенного збагачення біогазу заснований на тому, що різні компоненти в біогазі мають різні температури і тиски зрідження. Очищення біогазу здійснюється при тиску 8 МПа і температурі – 170 °С у чотири етапи, що включають стискання і охолодження. На першому етапі від біогазу відокремлюються силосани, H_2S , волога та галогени [10, 16, 17]. На другому етапі вільний від домішок газ стискається до тиску 1 МПа, а потім пропускається через теплообмінник, де охолоджується до – 25 °С. На третьому етапі цей охолоджений газ додатково охолоджується до – 55 °С, тоді CO_2 переходить у рідкий стан. На четвертому етапі газ охолоджується до температури – 85 °С, під час якого CO_2 затвердіває та відокремлюється від газу. У процесі кріогенної сепарації чистий вуглекислий газ виробляється як побічний продукт, що може принести додатковий дохід. Процес кріогенної сепарації також добре підходить для виробництва рідкого біометану. Недоліком використання низькотемпературної технології для обробки біогазу є вартість відділення діоксиду вуглецю, що залишається досить високою порівняно з іншими методами.

Окрім розглянутих вище фізико-хімічних методів, існують також **біологічні методи збагачення біогазу** [9]. Один із способів полягає у використанні хемоавтотрофних мікроорганізмів (наприклад, Архей), що перетворюють CO_2 на метан шляхом реакції з воднем. Процес потребує додаткового введення водню, що може бути отриманий шляхом електролізу, а також теплової енергії. Процес метанації можна проводити як безпосередньо в біогазовому реакторі ("in-situ"), так і в окремому реакторі ("ex-situ") [14].

Інший спосіб полягає у використанні фотоавтотрофних мікроводоростей, які в окремому фотобіореакторі поглинають CO_2 з біогазу, продукуючи при цьому завдяки фотосинтезу додаткову біологічну масу, яка в свою чергу може бути використана як сировина для виробництва біогазу чи для інших потреб. Середовищем для розвитку мікроводоростей може бути рідка фаза дигестату. Крім CO_2 , відбувається одночасне поглинання H_2S , що дає певні переваги [14].

Ще одним напрямком є використання CO_2 у біогазі для виробництва високоцінних хімічних сполук (наприклад, бутанолу, етанолу і ацетату) за допомогою інших методів біологічної модернізації, зокрема, ферментації. Такі мікроорганізми як *Clostridium scatologenes*, *Acetobacterium woodii* і *Butyribacterium methylotrophicum* можуть перетворювати CO_2 і H_2 на розчинні органічні продукти. Також, відомо про деякі ферментаційні процеси, що можуть перетворювати CO_2 і цукор безпосередньо в карбонові кислоти. Вуглекислий газ у біогазі також можна перетворити на сукцинат шляхом ферментації глюкози за допомогою *Actinobacillus succinogenes* [18].

Також до біологічних методів можна віднести спосіб, що використовує біоелектрохімічні системи (BES) для

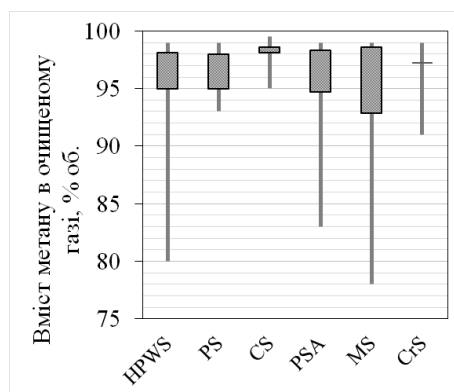
підвищення якості біогазу шляхом біоелектрохімічного відновлення CO_2 до CH_4 . Технологія передбачає електродні реакції, головним чином розщеплення води та виділення кисню на аноді з одночасним відновленням CO_2 до CH_4 на катоді. BES живиться від зовнішнього джерела електроенергії та каталізується активною метаногенною мікробною спільнотою, розташованою на катоді [19]. На даний час біологічні способи ще знаходяться на стадії дослідження та вдосконалення методів їх практичної реалізації.

В Табл. 2 та на рис. 3 представлено основні виробничі характеристики технологій, заснованих на фізико-хімічних методах очищення біогазу. На рис. 3 вертикальні лінії позначають весь діапазон значень показників, що зустрічається в літературі, а темні прямокутники- діапазон значень, що зустрічаються найбільш часто.

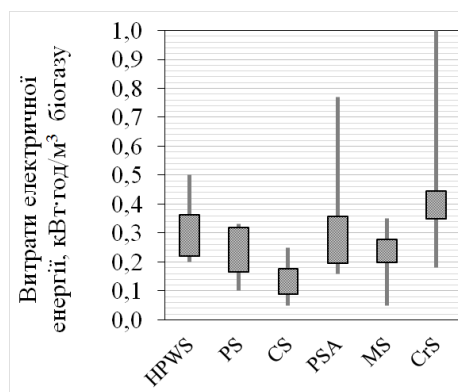
На основі аналізу численних публікацій можна зробити висновок, що кожна з технологій, що застосовуються на етапі основного очищення, має свої переваги та недоліки (табл. 3).

В табл. 4 наведено показники питомих виробничих витрат для різних технологій.

На рис. 4 показано апроксимацію літературних даних щодо капітальних витрат на впровадження розглянутих технологій збагачення біогазу. Також на цьому рисунку показано отримані залежності для орієнтовної оцінки питомих капітальних витрат для цих технологій, крім криогенної сепарації, через недостатню кількість даних. Як видно з представлених даних, на питомі капітальні витрати більше впливає масштаб впровадження (продуктивність установки), ніж застосовувана технологія.



а) ступінь чистоти отриманого біометану



б) питомі витрати електричної енергії

Рис. 3. Показники ефективності застосування технологій збагачення біогазу

Табл. 2. Основні виробничі характеристики технологій збагачення біогазу [20, 21]

Параметр	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
Діапазон продуктивності технології, м ³ /годину·біометану (м ³ /годину біогазу)	300-800 (600-1500)	200-1200 (400-2200)	300-1500 (600-2800)	400-2000 (700-3700)	50-500 (100-900)	н/д
Масштаби підприємств	малі, середні	середні, великі	середні, великі	середні, великі	малі, середні	великі
Питома потреба в площі та висота обладнання,	(м ² площі/м ³ біогазу/годину) x м (висоти)					
	0,18 x 4	0,15 x 12	н/д	0,17 x 12	0,1 x 2,5	0,12 x 3
Частка вловленого метану, % від вмісту в біогазі	98,0	98,0	96,0	99,96	80-99,5	98-99,9
Типовий надлишковий тиск в процесі, МПа	0,1-1	0,4-1	0,4-0,8	0,005-0,4	0,7-2	1-8
Тиск газу на виході, МПа	0,4-0,5	0,7-1	0,13-0,75	0,4-0,5	0,4-0,6	0,8-1
Потреба в тепловій енергії (кВт·год/м ³ біогазу) та температурний рівень	—	—	<0,2 70-80 °C	0,5-0,75 120-160 °C	—	—
Необхідність попереднього очищення біогазу	так	реком.	реком.	так	реком.	так
Однчасне вловлювання H ₂ S	можливе	так	можливе	ні (забруднювач)	можливе	так
Однчасне вловлювання N ₂ та O ₂	можливе	ні	ні	ні	частково	так
Необхідність обробки відхідних газів	так	так	так	ні	так	так
Необхідність у воді	ні	так	ні	так	ні	ні
Потреба у витратних матеріалах		Засоби для усунення відкладень, осушувачі	Органічний розчинник (безпечний)	Розчин амінів (небезпечний, корозійний)	—	н/д
Допустимі відхилення навантаження, % від ном.	85-115	50-100	50-100	50-100	50-105	н/д

На рис. 5 показано динаміку впровадження різних технологій збагачення біогазу в Європі та їх частку в 2021 році. Звертає на себе увагу стрімке зростання частки мембранної сепарації у нових проектах після 2014 року, особливо помітне в 2019-2021 роках. З 2017 року переважна частина нових біометанових заводів застосовували саме цю технологію. В результаті, зараз мембранна сепарація займає в Європі найбільшу частку (47%), випередивши технології HPWS та CS, що були лідерами раніше. Одна із причин вбачається у покращенні експлуатаційних характеристик установок

мембранної сепарації, пов'язаному з розробленням нових типів високоселективних мембран, що в поєднанні з можливістю використовувати кілька послідовних стадій очищення дозволяє отримувати біометан дуже високої чистоти [21]. Це, разом з іншими перевагами, такими як компактність, можливість масштабування на різні потужності, відсутність необхідності в хімічних реагентах, незначна кількість рухомих частин у обладнанні, просте обслуговування, робить дану технологію достатньо привабливою для впровадження.

Табл. 3. Переваги та недоліки технологій основного очищення біогазу

Технологія	Переваги	Недоліки
HPWS	Комбіноване видалення CO_2 та H_2S ; низькі втрати метану ($<2\%$); використану воду можна регенерувати; стійкість до домішок; простота в управлінні; відсутність хімікатів.	Низька інтенсивність процесу; можливе засмічення та піноутворення, викликане зростанням мікробної біомаси; можлива корозія, викликана H_2S ; потрібна велика кількість води навіть за умови її регенерації.
PS	Комбіноване видалення CO_2 , H_2S , HCN , H_2O ; Низькі втрати CH_4 ; енергоефективніший процес, ніж у водяному скрубєрі, що вимагає меншої площі для розміщення.	Для невеликих продуктивностей спосіб дорогий; додаткова витрата теплової енергії на регенерацію розчинника; розчинник дорогий і вимагає спеціального поводження.
CS	Висока концентрація CH_4 в біометані за рахунок високої вибіркової поглинання розчинником; дуже низькі втрати CH_4 ($<0,1\%$); весь H_2S можна видалити за низького тиску; швидкий процес, ніж у водяному скрубєрі, і розчинник легко регенерувати.	Для регенерації розчинника необхідна теплота в кількості 0,4-0,8 кВт·год/м ³ біогазу; розчинник дорогий, вимагає особливого поводження, його не можна зливати в навколишнє середовище; корозія, розкладання розчинника, спінювання, випадання солей.
PSA	Комбіноване видалення CO_2 , N_2 та O_2 ; компактна технологія, доступна для невеликих масштабів; швидкий монтаж і запуск; низька потреба в енергії; немає потреби в хімікатах.	Потрібне попереднє видалення H_2S і H_2O ; домішки можуть спричинити забруднення та незручності в роботі; вимагає тонкого настроювання систем регулювання тиску; високі механічні навантаження на обладнання.
MS	Комбіноване видалення CO_2 , H_2S , H_2O ; масштабування для невеликих установок; послідовним встановленням 2-3 ступенів мембранного очищення можна досягти високої чистоти біометану ($>99\%$); мало рухомих частин, надійна конструкція, не використовуються хімікати; просте обслуговування.	Низька селективність мембран; низький вихід CH_4 в одностадійному мембранному процесі (для біометану високої чистоти необхідні кілька етапів мембранного очищення); можливі втрати метану (до 10%); після розділення необхідна доочистка біометану від H_2S .
CrS	Високий ступінь розділення, отримання CO_2 високої чистоти, який можна виробляти для подальшого використання; низькі додаткові витрати енергії для виробництва рідкого біометану (bio-LNG); екологічно чистий, без додаткових хімікатів.	Високі інвестиційні, експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування; велика потреба в енергії для охолодження; залишки CO_2 можуть залишатися в CH_4 , призводячи до поломок на стадії зрідження метану.

Табл. 4. Питомі виробничі витрати для різних технологій, €/цент/м³ біометану [20, 22]

Продуктивність по біометану:	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
100 м ³ /годину	12,8	14,0	13,8	14,4	10,8-15,8	40,0
250 м ³ /годину	10,1	10,3	10,2	12,0	7,7-11,6	
500 м ³ /годину	9,2	9,1	9,0	11,2	6,5-10,1	

Висновки

Наведені дані показують, що немає значної різниці в інвестиційних витратах між різними технологіями збагачення біогазу (крім технології криогенної сепарації,

що є відчутно дорожчою). Енергоспоживання також досить однакове для різних технологій. Тому при виборі технології збагачення біогазу важливо враховувати інші аспекти, зокрема, його походження (біогаз, звалищний

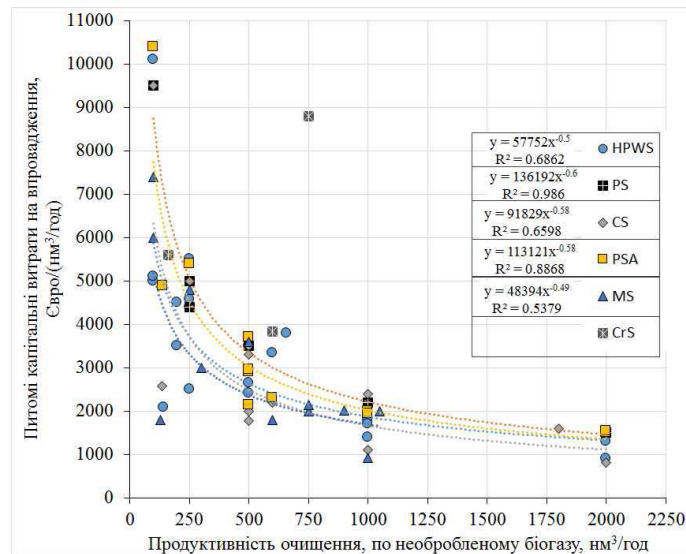


Рис. 4. Питомі капітальні витрати технологій збагачення біогазу

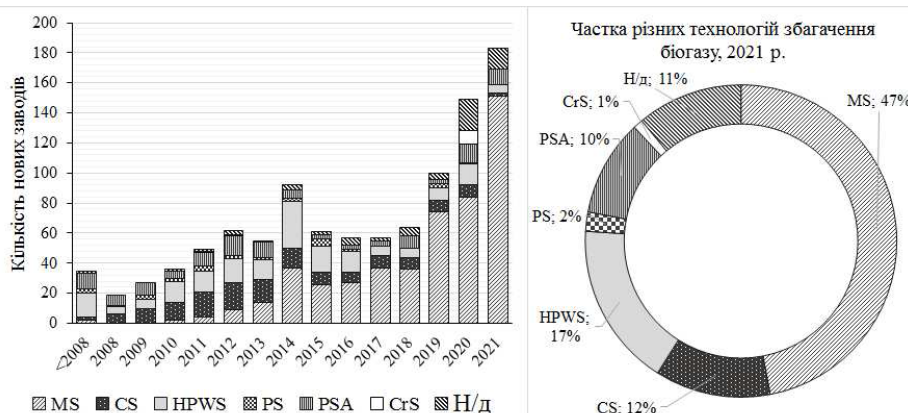


Рис. 5. Розповсюдженість різних технологій збагачення біогазу в Європі [23]

газ), використана сировина, наявність тих чи інших домішок у складі біогазу та здатність різних технологій їх видаляти, особливі вимоги до якості біометану, необхідність запобігати його викидам в атмосферу, умови впровадження (наявність виробничої площі, доступність води, хімічних реагентів), необхідний тиск біометану на виході з установки, тощо. Досить широкі діапазони технологічних показників, що зустрічаються в літературі, показують необхідність аналізу конкретних пропозицій постачальників технологій збагачення біогазу та порівняння значень показників, що гарантують постачальники при застосуванні їх обладнання.

В умовах України більш актуальними для збагачення біогазу можуть бути технології PSA та MS з огляду на відсутність потреби у воді та хімічних речовинах, можливість застосування в тому числі на невеликих біогазових станціях, а також на перспективу подальшого вдосконалення цих технологій. Крім того, досі перспек-

тивною може бути технологія HPWS завдяки її простоті та відносно невеликим капітальним витратам. Для всіх застосованих технологій необхідне очищення відхідних газів від залишків метану, що є сильним парниковим газом. Досягнення менших питомих викидів парникових газів на одиницю енергії виробленого біометану покращує умови його можливого експорту, зменшує вплив на оточуюче середовище.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev. Prospects and potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoeet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>.

2. *Atelge, Rasit & Senol, Halil, et al.* A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. *Sustainability* 2021, 13, 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.
3. *Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, et al.* Biogas handbook, Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, ISBN 978-87-992962-0-0, <http://www.sdu.dk>.
4. *Кодекс газотранспортної системи, затверджений постановою НКРЕКП № 2493 від 30.09.2015.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>.
5. *Технічні умови приєднання до газорозподільної системи виробників біометану.* РГК Вінницязгаз. <https://vn.dsoua.com/app.php/ua/files/43631/1>.
6. *Andlar M, Belskaya H, et al.* Biogas Production Systems and Upgrading Technologies: A Review. *Food Technol Biotechnol.* 2021 Dec;59(4):387-412. doi:10.17113/ftb.59.04.21.7300.
7. *Xiao Yuan Chen, Hoang duc Vinh, Antonio Avalos Ramirez* 2015, Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, *RSC advances* 2015 v.5 no.31 pp. 24399-24448. DOI:10.1039/C5RA00666J.
8. *J. M. Mutunga, H. M. Ndiritu, et al.* Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Proceedings of the 2022 Sustainable Research and Innovation Conference JKUAT Main Campus, Kenya, 5 - 6 October, 2022.*
9. *Angelidaki, Irini & Xie, Li & Luo, Gang, et.al* (2019). Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies. DOI:10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6.
10. *Michael Beil, Wiebke Beyrich, 15 - Biogas upgrading to biomethane, Editor(s): Arthur Wellinger, Jerry Murphy, David Baxter, In Woodhead Publishing Series in Energy, The Biogas Handbook, Woodhead Publishing, 2013, Pages 342-377, ISBN 9780857094988, https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.342.*
11. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari, et al.* Biogas Drying and Purification Methods. Centria University of Applied Sciences 2020, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8>.
12. *Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., & Tamm, D.* (2013). Biogas upgrading - Review of commercial technologies. (SGC Rapport; Vol. 270). Svenskt Gastekniskt Center AB. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>.
13. *Adnan, & Ong, & Nomanbhay, & Kit Wayne, Chew & Show, Pau-Loke.* (2019). Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Bioengineering.* DOI:10.3390/bioengineering6040092.
14. *Lóránt, Bálint, and Gábor Márk Tardy.* Current Status of Biological Biogas Upgrading Technologies. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, vol. 66, no. 3, Mar. 2022, p. 465. Budapest University of Technology and Economics, <https://doi.org/10.3311/ppch.19537>.
15. *M. Gruenewald, A. Radnjanski, 14 - Gas-liquid contactors in liquid absorbent-based PCC, Editor(s): Paul H.M. Feron, Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide, Woodhead Publishing, 2016, Pages 341-363, ISBN 9780081005149, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100514-9.00014-7.*
16. *Petersson, Anneli & Wellinger, Arthur.* (2009). Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations. IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas. 37.
17. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari et al.* Biogas Drying and Purification Methods. Centria University of Applied Sciences 2020, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8>.
18. *Muhammad Usman Khan, Jonathan Tian En Lee et al.* Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 2021, 111343, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>.
19. *Aryal, Nabin & Ottosen, Lars & Kofoed, Michael & Pant, Deepak.* (2021). Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading. doi:10.1016/C2019-0-01200-9.
20. *Aile, Nantes* (2012). Biogas to Biomethane Technology Review. Vienna Univ. Technology (Austria), Inst. Chem. Eng. Res. Div. Therm. Process Eng. Simul., (May): 1–15.
21. *Lems, R., Langerak, J., Dirkse E.H.M.* Next Generation Biogas Upgrading Using High Selective Gas Separation Membranes. - Showcasing the Poundbury Project - DMT Environmental Technology. 17th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2013.
22. *Rosa, M. D.* (2018). Economic assessment of producing and selling biomethane into a regional market. *Energy & Environment.* <https://doi.org/10.1177/0958305X18762581>.
23. *EBA (European Biogas Association)* (2022). Tracking biogas and biomethane deployment across Europe. Statistical report.

BIOGAS UPGRADING TECHNOLOGIES AND THEIR CHARACTERISTICS

Kramar V.G., Ph.D.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>

Recently, in Ukraine, the interest of biomethane producers in the implementation of biogas upgrading technologies for supply of biomethane to the natural gas network is growing. The purpose of this article is to inform industry specialists about the main existing biogas upgrading technologies and their technical and economic characteristics, comparing their strengths and weaknesses. There is a rapid increase in the use of membrane separation in Europe, which has become the main method of biogas purification at new enterprises in recent years. In general, the given data show that there is no significant difference in investment costs between different biogas upgrading technologies (except cryogenic separation technology, which is significantly more expensive). In addition, the power consumption is quite similar for different technologies. Therefore, when choosing a biogas upgrading technology, it is important to consider other aspects, in particular, its origin (biogas, landfill gas) and raw materials used (agricultural waste, solid household waste), the presence of certain impurities in the composition of biogas and the ability of various technologies to remove them, special requirements for the quality of biomethane, the need to prevent its emissions into the atmosphere, implementation conditions (availability of production space, water supply, chemical reagents), the required pressure of biomethane at the outlet of the installation, etc. The rather wide ranges of technological indicators found in the literature, especially regarding such key parameters as the purity of the obtained biomethane, the specific use of electrical energy, show the need to analyze the specific proposals of suppliers of biogas upgrading technologies and compare the values of the indicators guaranteed by suppliers at application of their equipment.

References 23, table 4, figure 5.

Keywords: biogas, biomethane, biogas purification technologies, CO₂ removal.

1. *Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev.* Prospects and potential for Biomethane Production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoeet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>.
2. *Atelge, Rasit & Senol, Halil, et al.* A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. *Sustainability* 2021, 13, 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.
3. *Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, et al.* Biogas handbook, Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, ISBN 978-87-992962-0-0, <http://www.sdu.dk>.
4. [Code of the gas transportation system, approved by the Decree of NEURC No. 2493 dated September 30, 2015]. (Ukr). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>.
5. [Technical requirements for connection of biomethane producers to the gas distribution system]. RGK Vinnytsiagaz (Ukr). <https://vn.dsoua.com/app.php/ua/files/43631/1>.
6. *Andlar M, Belskaya H, et al.* Biogas Production Systems and Upgrading Technologies: A Review. *Food Technol Biotechnol*. 2021 Dec;59(4):387-412. doi:10.17113/ftb.59.04.21.7300.
7. *Xiao Yuan Chen, Hoang duc Vinh, Antonio Avalos Ramirez* 2015, Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, *RSC advances* 2015 v.5 no.31 pp. 24399-24448. DOI:10.1039/C5RA00666J.
8. *J. M. Mutunga, H. M. Ndiritu, et al.* Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Proceedings of the 2022 Sustainable Research and Innovation Conference JKUAT Main Campus, Kenya, 5 - 6 October, 2022*.
9. *Angelidaki, Irini & Xie, Li & Luo, Gang, et al.* (2019). Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies. DOI:10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6.
10. *Michael Beil, Wiebke Beyrich, 15 - Biogas upgrading to biomethane, Editor(s): Arthur Wellinger, Jerry Murphy, David Baxter, In Woodhead Publishing Series in Energy, The Biogas Handbook, Woodhead Publishing, 2013, Pages 342-377, ISBN 9780857094988, https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.342.*
11. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari, et al.* Biogas Drying and Purification Methods. *Centria University of Applied Sciences* 2020, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8>.
12. *Bauer, F., Hultberg, C., Persson, T., & Tamm, D.* (2013). Biogas upgrading - Review of commercial technologies. (SGC Rapport; Vol. 270). *Svenskt Gastekniskt Center AB*. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>.

13. *Adnan, & Ong, & Nomanbhay, & Kit Wayne, Chew & Show, Pau-Loke.* (2019). Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. Bioengineering. DOI:10.3390/bioengineering6040092.
14. *Lóránt, Bálint, and Gábor Márk Tardy.* Current Status of Biological Biogas Upgrading Technologies. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, vol. 66, no. 3, Mar. 2022, p. 465. Budapest University of Technology and Economics, <https://doi.org/10.3311/ppch.19537>.
15. *M. Gruenewald, A. Radnjanski,* 14 - Gas-liquid contactors in liquid absorbent-based PCC, Editor(s): Paul H.M. Feron, Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide, Woodhead Publishing, 2016, Pages 341-363, ISBN 9780081005149, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100514-9.00014-7>.
16. *Petersson, Anneli & Wellinger, Arthur.* (2009). Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations. IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas. 37.
17. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari et al.* Biogas Drying and Purification Methods. Centria University of Applied Sciences 2020, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8>.
18. *Muhammad Usman Khan, Jonathan Tian En Lee et al.* Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 149, 2021, 111343, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>.
19. *Aryal, Nabin & Ottosen, Lars & Kofoed, Michael & Pant, Deepak.* (2021). Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading. doi:10.1016/C2019-0-01200-9.
20. *Aile, Nantes* (2012). Biogas to Biomethane Technology Review. Vienna Univ. Technology (Austria), Inst. Chem. Eng. Res. Div. Therm. Process Eng. Simul., (May): 1–15.
21. *Lems, R., Langerak, J., Dirkse E.H.M.* Next Generation Biogas Upgrading Using High Selective Gas Separation Membranes. - Showcasing the Poundbury Project - DMT Environmental Technology. 17th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2013.
22. *Rosa, M. D.* (2018). Economic assessment of producing and selling biomethane into a regional market. Energy & Environment. <https://doi.org/10.1177/0958305X18762581>.
23. *EBA (European Biogas Association)* (2022). Tracking biogas and biomethane deployment across Europe. Statistical report.

Отримано 08.02.2023

Received 08.02.2023

УДК 620.92

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНОГО ВІДНОВЛЮВАНОВОГО МЕТАНУ

Клименко В.М., член-кореспондент НАН України, Супрун Т.Т., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.9>

Розглянуті питання економічної доцільності виробництва синтетичного відновлюваного метану в різних країнах. Наведені деякі результати техніко-економічного аналізу технологій виробництва синтетичного відновлюваного метану, отримані в реалізованих проектах.

The issues of economic feasibility of synthetic renewable methane production in different countries are considered. Some results of the techno-economic analysis of synthetic renewable methane production technologies obtained in ongoing projects are presented.

Бібл. 16, рис.2.

Ключові слова: синтетичний відновлюваний метан, процеси метанації, техніко-економічний аналіз, відновлювані джерела енергії.

Вступ

На сьогоднішній день природний газ залишається одним з основних джерел енергії. Його споживання у світі досягло майже 4000 млрд м³ на рік, і з них біля 10% - у країнах Євросоюзу. В останні роки обмежена доступність до джерел видобутку природного газу призвела до надмірної політизації процесів його споживання з загостренням стосунків між країнами виробниками і споживачами природного газу. Крім того, природний газ залишається потужним джерелом викидів CO₂ при його спалюванні (на рівні 56 кг CO₂/ГДж). В останні роки все більше уваги приділяється розробці і освоєнню інших газових джерел енергії, серед яких найбільший інтерес і увагу привертають ті, які ґрунтуються на використанні біомаси, тобто є, по суті, відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) і тому дозволяють окрім всього вирішувати екологічні проблеми сучасної енергетики.

Основною заміною природного газу може стати біометан, для виробництва якого використовують ряд вже існуючих технологій. Одним із напрямків отримання біометану є збагачення біогазу шляхом вилучення з нього вуглекислоти, як одного з продуктів анаеробного зброджування біомаси. Цей напрямок реалізується за допомогою різноманітних технологій сепарації CO₂ з газової суміші (якою є біогаз) таких, як мембранна, криогенна, адсорбція при змінному тиску, водяне очищення та інші. Другим напрямком виробництва синтетичного відновлюваного метану (СВМ) є метанація, тобто процес поєднання вуглекислоти і водню в реакції

Сабатьє, в тому числі поєднання з CO₂, вилученим з біогазу. Цей процес здійснюється в спеціальних реакторах за участі хімічних і біологічних каталізаторів, як з використанням систем охолодження, так і без них. Таким чином, виробництво СВМ здійснюється в складних і дорогих установках, в яких протікають різноманітні біологічні, хімічні, гідро-аеродинамічні та теплообмінні процеси зі застосуванням існуючих і спеціально розроблюваних технологій.

Огляду вже існуючих технологій виробництва синтетичного відновлюваного метану були присвячені наші попередні публікації [1, 2]. В рамках цих робіт не вдалось отримати відповідь на питання - яка з технологій може бути рекомендована для впровадження в Україні, бо це можна зробити тільки на основі техніко-економічного аналізу технологій виробництва синтетичного відновлюваного метану. Цілком зрозуміло, що техніко-економічний аналіз таких проєктів є надзвичайно складним і потребує застосування спеціальних підходів і спрощень. Завдання ускладняється ще й тим, що ціна елементів технологічної схеми, є, як правило, невизначеною, або ж коливається в широкому діапазоні значень.

Метою роботи є огляд світового досвіду техніко-економічного аналізу технологій виробництва синтетичного відновлюваного метану. Використання такого досвіду є **актуальним** для України, де в останні роки почали активно розвиватись роботи з розробки та впровадження біометанових технологій [3].

1. Методика техніко-економічного аналізу

Основною метою економічного аналізу є визначення мінімальної ціни виробленого синтетичного відновлюваного метану, яка б забезпечила повернення інвестицій в передбачуваний проєктом термін. Розрахунки проводяться дисконтними методами, які ґрунтуються на визначенні чистої приведеної вартості Net Present Value (NPV), що представляє собою суму дисконтованих грошових потоків (CF), реалізованих протягом терміну роботи системи (N), охопленого аналізом і дисконтованих з використанням відомого значення ставки дисконту (r) за наступною формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=N} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Грошові потоки (CF) розраховуються за рівнянням:

$$CF_t = [-J + S - (C_{op} + T_{in} + C_{wc}) + A + L]_t, \quad (2)$$

де J - інвестиційні витрати, S - дохід від продажів, C_{op} - експлуатаційні витрати, T_{in} - податок на прибуток, C_{wc} - зміна оборотного капіталу, A - амортизація, L - ліквідаційна вартість, t - кількість послідовних років з початку інвестицій.

При умові (NPV)=0 визначається беззбиткова ціна виробництва синтетичного відновлюваного метану або відновлюваного природного газу (RNG) c_{RNG} . Ця ціна відома також як приведена вартість, що є мінімальною ціною продажу виробленого відновлюваного газу, яка забезпечує рентабельність інвестиції через визначений період часу, тому її можна розрахувати за рівнянням:

$$c_{RNG} = \frac{\sum_{t=0}^{t=N} \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t=N} P_{RNG}}, \quad (3)$$

де P_{RNG} - річне виробництво RNG, виражене в ГДж (МВт.год). Ця величина зручна при економічному аналізі, тому що безпосередньо визначає вартість виробництва одиниці енергії.

Як це впливає з наведеного вище, надійність економічних розрахунків визначається перш за все достовірністю визначення інвестиційних (CAPEX) та експлуатаційних (OPEX) витрат. Це особливо важко зробити, коли треба оцінити нові технології, і особливо це стосується інвестиційних витрат.

Одним із двох методів оцінки капітальних витрат реалізації технологій виробництва енергії, або ж їх компонентів в складі проєкту, є використання експоненціального рівняння:

$$J_E = J_R \left(\frac{X_E}{X_R} \right)^\alpha, \quad (4)$$

де J_E - вартість розрахункового елементу (для обладнання, чи механізму, що входить в схему), J_R - вартість еталонного (базового) елементу, X_E та X_R - характеристичний дискримінант розрахункового і базового елемента (наприклад, номінальна потужність, розмір, або ж витрати основного потоку), α - показник ступеня масштабування, який зазвичай приймається для енергосистем в межах від 0,6 до 0,7.

Другий метод розрахунку інвестицій в проєкт полягає у використанні індексу питомих інвестиційних витрат, вираженого в грошових одиницях (наприклад, в євро чи доларах США) і пов'язаного з типовими параметрами використаних систем, машин, або пристроїв, наприклад, номінальною потужністю, чи номінальними витратами. У цьому випадку загальні капітальні витрати J можна розрахувати за приблизною залежністю:

$$J = c_i X, \quad (5)$$

де c_i - питомі інвестиційні витрати, виражені, наприклад, в євро/МВт, а X - характеристичний дискримінант.

Операційні витрати (OPEX) бувають двох видів: постійні та змінні. Фіксовані експлуатаційні витрати залежать від часу роботи агрегатів та включають планове технічне обслуговування, страховку, витрати на персонал і т.п. Зазвичай вони становлять від 1% до 5% капіталовкладень, можуть змінюватись в залежності від окремого підрозділу на виробництві PtG та виражені у євро/рік. Змінні операційні витрати залежать від продуктивності системи, використання установки, сировини, тощо, і виражаються в євро/кВт·год.

2. Техніко-економічний аналіз виробництва синтетичного відновлюваного метану

На сьогоднішній день в світі вже працює велика кількість лабораторних, пілотних і демонстраційних установок PtG, на яких відпрацьовуються технології виробництва синтетичного відновлюваного метану з метою зниження його приведеної вартості до рівня, конкурентоздатного з природним газом. Існують також дослідження, в яких для техніко-економічного аналізу систем виробництва CBM були розроблені математичні моделі. При побудові таких моделей спочатку ство-

рювались і верифікувались моделі окремих вузлів, що входять до загальної схеми, з використанням існуючих літературних даних, а потім ці елементи інтегрувались в загальну схему.

2.1. Техніко-економічний аналіз проєктів з каталітичною метанацією

В роботах [4-14] розглядались різні аспекти техніко-економічного аналізу процесів каталітичної метанації. Зокрема, метою роботи [4] було визначення оптимальної конфігурації технологічного процесу для виробництва синтетичного відновлюваного метану, тобто визначення того, яка комбінація джерел водню і CO_2 забезпечить мінімальні виробничі витрати на основі ефективності, капітальних витрат, експлуатаційних витрат, попиту і року експлуатації. Ця робота також фокусується на виявленні найважливіших факторів витрат при виробництві CBM. Було розроблено оптимізаційну модель для дослідження продуктивності різних конфігурацій процесу. Розглянуті схеми були комбінацією таких компонентів, як метанатор, електролізер, установка для збагачення біогазу і сховище водню. Водень для процесу метанації отримувався в електролізері з використанням відновлюваної електроенергії, або ж зі сховища водню. Основним джерелом CO_2 розглядався біогаз, або ж CO_2 з окремого сховища. В цій роботі зазначено, що найнижча собівартість CBM, виявлена в перший рік виробництва, становить 0,432 євро/кВт·год. Отримана дисконтована вартість виробництва показує, що найнижча вартість CBM через 20 років становить 0,143 євро/кВт·год. Змінною, що надає найбільший вплив на собівартість виробництва, є капітальні витрати на метанатор та електролізер, а також узгодження потужності метанатора з мінімально необхідним виробництвом CBM. Більш доцільною є організація довгострокового виробництва CBM. Капітальні витрати для технології PtG сьогодні є відносно високими, але в той же час очікується тенденція до їх зниження через технологічний розвиток та стандартизовані розміри і серії.

В огляді технологій та проєктів PtG, приведених в роботі [5], зазначається, що CBM в 2018 р. оцінюється в 70-125 євро/МВт·год, що у 2-7 разів більше, ніж у природного газу. Щоб конкурувати з природним газом, ціна CBM має бути знижена щонайменше до 40 євро/МВт·год. Це можна досягнути за рахунок технологічного вдосконалення ефективності електролізера та зниження капітальних витрат на метанацію, а також запровадження державної підтримки. Процес виробництва CBM є більш економічним, якщо він працює як безперервний або сезонний виробничий процес, а не як проміжне зберігання.

Переривчастий та нестаціонарний характер енергопостачання електролізера від ВДЕ значно погіршують умови ефективної роботи метанатора і економіку роботи установки PtG в цілому. Проблему можна частково вирішувати шляхом застосування резервуару для зберігання водню, генерованого в електролізері, що дозволяє забезпечити безперебійну роботу метанатора, а також за рахунок оптимізації операційних стратегій та конфігурацій процесів PtG.

В роботі [6] розглянуто чотири концепції електропостачання електролізера в поєднанні з двома стратегіями продажу CBM в рамках довгострокових контрактів та короткострокових ринків на період до 2030 і 2050 років. При операційній стратегії безперервної роботи установки протягом року на період до 2030 року спостерігається лінійна залежність приведеної вартості CBM в діапазоні від 33,6 євро/МВт·год при безкоштовній електроенергії для живлення електролізера до 204,8 євро/МВт·год при ціні електроенергії 100 євро/МВт·год. В роботі показано, що з урахуванням очікуваних в майбутньому змін капітальних і експлуатаційних витрат, цін на електроенергію, на газ, а також рівня ефективності PtG, процес виробництва CBM може стати рентабельним уже до 2030 року при ціні на електроенергію не вище 24 євро/МВт·год і ціні природного газу 70 євро/МВт·год. При цьому беззбиткова приведена вартість очікується приблизно в 75 євро/МВт·год, в якій витрати на електроенергію складатимуть 55%, на вуглекислий газ 10%, OPEX 10% і CAPEX 23%. В цій роботі передбачається, що вартість капіталовкладень технологічних установок PtG знизиться до 50%, особливо для метанатора та електролізера, які, як очікується, в 2050 р. знизяться до 70%.

В роботі [7] досліджено, як можна використати установки PtG для оптимізації використання ВДЕ в розподільчих мережах електроенергії і природного газу і тим самим підвищити гнучкість вказаних енергетичних систем. Так, завдяки використанню буферних ємностей для водню в системі електролізу є можливість акумулювання надлишкової електроенергії від ВДЕ з використанням водню в часи "провалів" для генерування CBM.

Такі ж можливості для акумулювання і регулювання виконують газові мережі по відношенню до генерованого CBM. Використання регулюючих можливостей установки PtG дозволяє забезпечити оптимальні умови її роботи і знизити приведену вартість генерованого CBM. Розрахунки приведеної вартості CBM були зроблені для різних очікуваних сценаріїв витрат в 2030 і 2050 роках при різній завантаженості підприємств - виробників CBM і при різній вартості електроенергії

від ВДЕ. При збільшенні завантаженості підприємства збільшується виробництво СВМ і побічних продуктів - кисню і теплоти, внаслідок чого зменшується приведена вартість СВМ. В роботі показано, що продаж побічних продуктів процесу PtG дозволяє суттєво (в середньому на 15%) зменшити приведену вартість СВМ. В [12] питомий прибуток від продажу O_2 оцінювався в 70 євро/т, а теплоти - в 30 євро/МВт·год.

На рис. 1 показані значення приведеної вартості СВМ в залежності від навантаження установки і вартості електроенергії від ВДЕ, що очікуються в 2030 і 2050 роках. На графіку приведені також дані, отримані в інших дослідженнях [6, 8-10].

В огляді [7] зроблено також прогноз, що до 2030 року очікується зменшення вартості електролізера на 25%, водневого буфера на 10% і реактора метанації на 33%, внаслідок чого собівартість СВМ зменшиться в середньому на 30% в залежності від конфігурації реалізованих систем PtG та їх узгодження з електричними і газорозподільними мережами в умовах суттєвого коливання у виробництві електричної енергії від відновлюваних джерел.

Детальний техніко-економічний аналіз кількох систем виробництва СВМ та біометану, розташованих в Іспанії, був виконаний в роботі [14]. Для аналізу було вибрано три системи:

1 – отримання біогазу шляхом анаеробного зброджування біомаси, його очищення від шкідливих домішок, збагачення біогазу шляхом вилучення CO_2 ;

2 – ферментація біомаси, очищення біогазу і його збагачення шляхом сполучення CO_2 , що входить до біогазу, з воднем, отриманим в електролізері з використанням відновлюваної електроенергії;

3 – газифікація біомаси в атмосфері кисню з наступною метанацією отриманого газу.

Для техніко-економічного аналізу вказаних трьох систем виробництва СВМ та біометану були розроблені математичні моделі в програмі Aspen Plus. У цій роботі економічний аналіз проводився на основі представленої вище методики, літературних даних та досвіду авторів у проведенні економічного аналізу систем енергогенерації. Основною метою економічного аналізу було визначення приведеної вартості виробленого метану, яка б забезпечила повернення інвестицій після прийнятого (в даному випадку – 20 річного) терміну роботи установки.

Найменша приведена вартість виробництва метану - 19,2 євро/ГДж була отримана для першого варіанту, що пов'язано з найменшими інвестиційними витратами, а найбільша - 39,2 євро/ГДж – у варіанті 3, що пов'язано з високою складністю та вартістю системи. У варіанті 2 приведена вартість складала 32,5 євро/ГДж. Як і очікувалося, розрахована ціна беззбитковості метану для всіх випадків вища, ніж ціна природного газу. Проте аналіз чутливості показує, що її можна зменшити з розвитком технології, що призведе до зниження витрат або при збільшенні доступності недорогої біомаси. В роботі було також досліджено, як впливає зміна CAPEX і OPEX на приведену вартість метану. Встановлено, що для всіх трьох варіантів збільшення (зменшення) CAPEX на 30% збільшує (зменшує) ціну метану приблизно на 13%. Вплив OPEX більш суттєвий - при такій же його зміні ціна метану змінюється на 22%. Показано також, як змінюється приведена вартість СВМ та біометану в залежності від часу роботи установки. Приведені вище значення вартості метану відповідають роботі установки протягом не менше 8000 годин на рік. При зменшенні цього періоду показники беззбиткової вартості метану збільшуються і особливо сильно при періоді роботи менше, ніж півроку (рис.2).

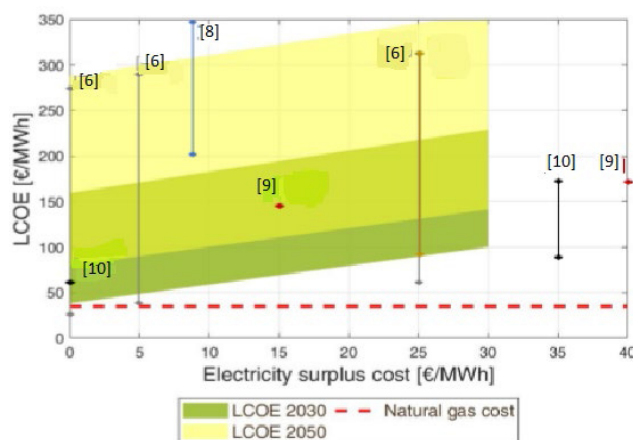


Рис. 1. Залежність приведеної вартості СВМ від вартості електроенергії [7]

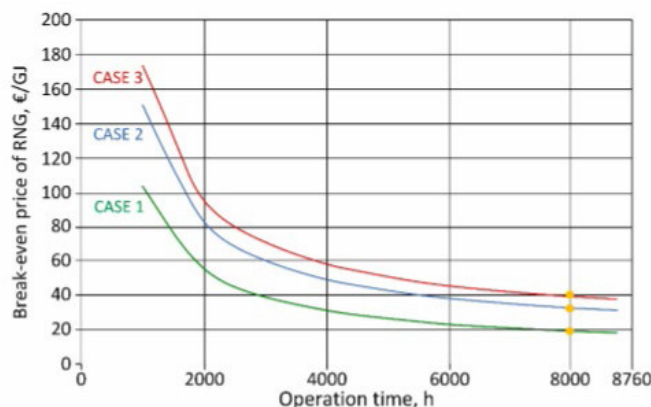


Рис. 2. Вплив часу роботи установки на безбиткову ціну СВМ та біометану [14]

Останні данні щодо ціни біометану в Європі були приведені в статистичному звіті 2022 р. Європейської біогазової асоціації [16]. Зокрема, витрати на виробництво біометану в результаті анаеробного зброджування склали в 2021 р. 80 євро/МВт·год, а за прогнозом на 2050 р. будуть складати 57-66 євро/МВт·год.

2.2. Техніко-економічний аналіз проєктів з біологічною метанацією

В роботі [15] зроблено детальний огляд біометанації, як одного з основних сучасних напрямків розвитку технологій PtG, у тому числі таких технологій, як *in situ* і *ex situ*, гібридна біометанація та підземна метанація.

Техніко-економічний аналіз різних сценаріїв біометанації показує, що вартість виробництва СВМ все ще значною мірою залежить від вартості генерації H_2 . Для того, щоб процес біометанації був повністю відновлюваним, H_2 , необхідний для реакції, має вироблятися з відновлюваних джерел. В даний час електроліз води є єдиною технологією, доступною в промислових масштабах, хоча його низька ефективність і високе енергоспоживання призводять до збільшення ціни виробництва H_2 .

Як і для інших процесів метанації, витрати на виробництво СВМ в значній мірі залежать від вартості виробництва водню (в схемах з електролізом - 7,7-8,6 євро/кг $_{H_2}$). В цьому відношенні інтерес викликають технології “темного бродиння” (2,15 євро/кг $_{H_2}$) та піролізу (1,38 євро/кг $_{H_2}$), як джерела більш дешевого водню, що дозволить знизити виробничі витрати та збільшити конкурентоспроможність СВМ на ринку.

Враховуючи характеристики процесу, для досягнення високої продуктивності слід застосовувати мезофільні та низькотемпературні процеси, що вимагають меншої кількості теплової енергії. Крім того, використання змішаних метаногенних консорціумів,

які потребують менш суворих умов і здатних рости в рідких відходах різних промислових процесів (тобто осад стічних вод, сироватка та стічні води), може додатково знизити витрати на процес, підвищуючи ринкову конкурентоспроможність біометанації. Нарешті, враховуючи, що в процесі біометанації вивільняється енергія у вигляді тепла, вона може бути відновлена та повторно використана для підтримки енергетичних потреб процесу або генерації H_2 .

Висновки

Сучасну систему PtG можна розглядати як джерело енергії альтернативне природному газу. На сьогоднішній день у світі вже відома велика кількість проєктів, які реалізують енергетичний ланцюжок PtG від отримання відновлюваної електроенергії, генерування за її допомогою водню в тих чи інших електролізерах, і до отримання синтетичного відновлюваного метану шляхом каталітичної або біологічної метанації. Техніко-економічний аналіз ряду реалізованих проєктів дозволив оцінити вплив тих чи інших факторів на ефективність процесу перетворення енергії та визначити шляхи вдосконалення технологій. На сьогоднішній день, на жаль, не існує жодної реалізованої технології, яка б дозволила отримувати СВМ за ціною меншою ніж ціна природного газу.

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

1. Якщо розглядати PtG як джерело альтернативного палива, то першочергового значення набуває питання рентабельності виробництва СВМ, коли його ціна стає меншою за ціну природного газу. Техніко-економічний аналіз технологій метанації, які реалізують концепцію PtG, дозволяє сподіватися, що уже на початку 2030 х років промислове виробництво синтетичного відновлюваного метану може стати рентабельним.

Такі сподівання підкріплюються ще й тим, що сучасні темпи зростання ціни природного газу суттєво перевищують показники, використані в існуючих аналітичних матеріалах.

2. Серед технологій виробництва CBM, що реалізуються сьогодні, найбільший інтерес для України становлять технології, пов'язані з біоенергетичним напрямком розвитку відновлюваної енергетики, в яких виробництво CBM може стати органічною складовою збагачення біогазу з використанням власного вуглекислого газу.

3. Серед технологій біометанації перспективним напрямком вважається поєднання схем in-situ і ex-situ, тому що це дозволяє забезпечити найбільш оптимальні умови для процесів анаеробного зброджування (виробництво біогазу) і біометанації (виробництво CBM).

4. Приведена вартість CBM лінійно зростає зі збільшенням капітальних і операційних витрат, ціни на біомасу і ціни електроенергії, що споживається електролізером, а також від ефективності його роботи в процесі генерування водню.

5. Основними напрямками розвитку технологій PtG і зменшення приведеної вартості CBM є:

- підвищення енергетичної ефективності процесів електролізу і метанації, тобто збільшення виходу продукту (водню або ж метану) при зниженні енергетичних витрат; за рахунок удосконалення технологій; використання внутрішніх енергетичних ресурсів (теплоти метанації, кисню з електролізу і т.п.); застосування більш ефективних процесів отримання водню, метану, вуглекислого газу;
- зменшення капіталовкладень за рахунок використання продуктивного обладнання і простіших технологій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Клименко В.М., Сунрун Т.Т.* Технології метанації для отримання синтетичного відновлюваного метану. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, т.44, №3. С.63-72 DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.6>
2. *Клименко В.М., Сунрун Т.Т.* Сучасні концепції Power to Gas та їх реалізація. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, т. 44, №4. С.40-50
3. *Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev.* Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

4. *D.Devaraj, E.Syron, P.Donnellan.* Synthetic natural gas production: production cost, key cost factors and optimal configuration. Int. J. of Energy Prod. & Mgmt., Vol. 5, No 2 (2020) 91-101. DOI: 10.2495/EQ-V5-N2-91-101

5. *Guilera, J., Morante, J.R. & Andreu, T.,* Economic viability of SNG production from power and CO₂. Energy Conversion and Management, 162, pp. 218–224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.037>

6. *Jachin Gorre, Felix Ortloff, Charlotte van Leeuwen.* Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage. Applied Energy 253 (2019) 113594 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113594>

7. *Gabriele Fambri, Cesar Diaz-Londono, Andrea Mazza, Marco Badami, Teemu Sihvonen, Robert Weiss.* Techno-economic analysis of Power-to-Gas plants in a gas and electricity distribution network system with high renewable energy penetration. Applied Energy, Volume 312, 15 April 2022, 118743 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118743>

8. *Salomone F, Giglio E, Ferrero D, Santarelli M, Pirone R, Bensaid S.* Techno-economic modelling of a Power-to-Gas system based on SOEC electrolysis and CO₂ methanation in a RES-based electric grid. Chem Eng J 2019;377:120233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.170>

9. *ENEA Consulting.* The potential of Power-to-Gas: Technology review and economic potential assessment. vol. 33. 2016. https://www.enea-consulting.com/static/3663dbb115f833de23e4c9_4c8fa399ec/enea-the-potential-of-power-to-gas.pdf

10. *McDonagh S, O'Shea R, Wall DM, Deane JP, Murphy JD.* Modelling of a power-to-gas system to predict the levelised cost of energy of an advanced renewable gaseous transport fuel. Appl Energy 2018;215:444–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.019>

11. *Gotz M., Lefebvre J., Mors F., Koch A.M., Graf F., Bajohr S., Reimert R. & Kolb T.,* Renewable power-to-gas: A technological and economic review. Renewable Energy, 2016, Volume 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>

12. *Breyer C, Tsupari E, Tikka V, Vainikka P.* Power-to-Gas as an Emerging Profitable Business through Creating an Integrated Value Chain. In: Energy Procedia, editor. 9th Int. Renew. Energy Storage Conf. IRES 2015, vol. 73, Düsseldorf, Germany: Elsevier B.V.; 2015, p. 182–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.668>

13. *T. Schaaf, J. Grunig, M.R. Schuster, T. Rothenfluh, A. Orth* Methanation of CO₂ - storage of renewable energy in a gas distribution system Energy, Sustain Soc, 4 (1) (2014), <https://doi.org/10.1186/s13705-014-0029-1>

14. Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboa, Javier Dufour Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems Energy Conversion and Management: X 7 (2020) 100046 <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100046>

15. Bellini, R.; Bassani, I.; Vizzarro, A.; Azim, A.A.; Vatile, N.S.; Pirri, C.F.; Verga, F.; Menin, B. Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂. Energies 2022, 15, 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>

16. EBA-Statistical-Report-2022 www.europeanbiogas.eu

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SYNTHETIC RENEWABLE METHANE PRODUCTION

Klimenko V.M., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, **Suprun T.T.**, PhD (Engin.)

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.9>

The high instability and intermittent nature of the generation of electrical energy from solar and wind power plants led to the creation and improvement of PtG technologies as the main means of coordinating the operating modes of such power plants with electric networks. The PtG concept involves the production of synthetic renewable methane (SRM) using surplus energy from renewable energy sources with the use or storage of it through gas networks. To date, the world already knows a large number of projects that implement the specified PtG energy chain from obtaining renewable electricity, using it to generate hydrogen in certain electrolyzers, and to obtaining synthetic renewable methane by catalytic or biological methanation, i.e., combining hydrogen with carbon dioxide. Techno-economic analysis of a number of implemented projects made it possible to assess the influence of certain factors on the efficiency of the energy conversion process and thus determine ways to improve technologies. The leveled cost of synthetic renewable methane or also known as break-even price of the production of SRM was selected as a criterion for evaluating the efficiency of a particular technology. To date, unfortunately, there is not a single implemented technology that would allow SRM to be obtained at a price lower than the price of natural gas. The main directions for the development of PtG technologies and reduction of the leveled cost of synthetic renewable methane are:

- increasing the energy efficiency of electrolysis and methanation processes, i.e. increasing the output of the product (hydrogen or methane) while reducing energy costs; due to the improvement of technologies; the use of internal energy resources (heat of methanation, oxygen from electrolysis, etc.); application of more efficient processes for obtaining hydrogen, methane, carbon dioxide;

- reduction of capital investments due to the use of productive equipment and simpler technologies.

A separate task of this study was to determine the prospects for the development of PtG, the most attractive for the conditions of Ukraine. Such a perspective, in our opinion, can be the bioenergy direction of the development of renewable energy, which can be organically combined with the concept of SRM production in the PtG process. In this direction, we can expect to reach a profitable level of SRM production by 2030.

References 16, fig. 2.

Key words: synthetic renewable methane, methanation processes, techno- economic analysis, renewable energy sources.

1. *Klimenko V.M., Suprun T.T.* [Methanation technologies for producing synthetic renewable methane]. [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2022, V.44, №3. P.63-72 DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.6> (Ukr)

2. *Klimenko V.M., Suprun T.T.* [Modern Power to Gas concepts and their implementation]. [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2022, V. 44, №4. P.40-50

3. *Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev.* Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

4. *D.Devaraj, E.Syron, P.Donnellan.* Synthetic natural gas production: production cost, key cost factors and optimal configuration. Int. J. of Energy Prod. & Mgmt., Vol. 5, No 2 (2020) 91-101. DOI: 10.2495/EQ-V5-N2-91-101

5. *Guilera, J., Morante, J.R. & Andreu, T.* Economic viability of SNG production from power and CO₂. Energy Conversion and Management, 162, pp. 218–224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.037>

6. *Jachin Gorre, Felix Ortloff, Charlotte van Leeuwen.* Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage. Applied Energy 253 (2019) 113594 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113594>

7. *Gabriele Fambri, Cesar Diaz-Londono, Andrea Mazza, Marco Badami, Teemu Sihvonon, Robert Weiss.* Techno-economic analysis of Power-to-Gas plants in a gas and electricity distribution network system with high renewable energy penetration. Applied Energy, Volume 312, 15 April 2022, 118743 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118743>

8. *Salomone F, Giglio E, Ferrero D, Santarelli M, Pirone R, Bensaid S.* Techno-economic modelling of a Power-to-Gas system based on SOEC electrolysis and CO₂ methanation in a RES-based electric grid. Chem Eng J 2019;377:120233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.170>

9. *ENEA Consulting*. The potential of Power-to-Gas: Technology review and economic potential assessment. vol. 33. 2016. <https://www.enea-consulting.com/static/3663dbb115f833de23e4c94c8fa399ec/enea-the-potential-of-power-to-gas.pdf>
10. *McDonagh S, O'Shea R, Wall DM, Deane JP, Murphy JD*. Modelling of a power-to-gas system to predict the levelised cost of energy of an advanced renewable gaseous transport fuel. *Appl Energy* 2018;215:444–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.019>
11. *Gotz M., Lefebvre J., Mors F., Koch A.M., Graf F., Bajohr S., Reimert R. & Kolb T.*, Renewable power-to-gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 2016, Volume 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
12. *Breyer C, Tsupari E, Tikka V, Vainikka P*. Power-to-Gas as an Emerging Profitable Business through Creating an Integrated Value Chain. In: *Energy Procedia*, editor. 9th Int. Renew. Energy Storage Conf. IRES 2015, vol. 73, Düsseldorf, Germany: Elsevier B.V.; 2015, p. 182–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.668>
13. *T. Schaaf, J. Grunig, M.R. Schuster, T. Rothenfluh, A. Orth* Methanation of CO₂ - storage of renewable energy in a gas distribution system *Energy, Sustain Soc*, 4 (1) (2014), <https://doi.org/10.1186/s13705-014-0029-1>
14. *Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboa, Javier Dufoura* Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems *Energy Conversion and Management: X* 7 (2020) 100046 <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100046>
15. *Bellini, R.; Bassani, I.; Vizzarro, A.; Azim, A.A.; Vasile, N.S.; Pirri, C.F.; Verga, F.; Menin, B.* Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂. *Energies* 2022, 15, 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>
16. *EBA-Statistical-Report-2022* www.europeanbiogas.eu

Отримано 07.02.2023

Received 07.02.2023

УДК 621.74:537.84

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДБИВНІЙ ПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ З ВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ

Пеньковий Т.О.^{1,3}, Халатов А.А.^{1,2}, академік НАН України, Гориславець Ю.М.³, докт. техн. наук

¹- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

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

³- Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.10>

Наведено результати тривимірного моделювання гідродинамічних та теплових процесів у відбивній плавильній печі з камерою вихрового руху рідкого металу, який створено дуговим індуктором. Результати у вигляді розподілу швидкості і температури рідкого металу отримані для двох варіантів (кутів) приєднання натискного каналу до вихрової камери печі. Показано, з точки зору перемішування рідкого металу у ванні печі кращим є тангенційне приєднання натискного каналу, а з точки зору функціонування вихрової камери більш ефективне приєднання під кутом 45° .

The paper presents the results of three-dimensional modeling of electromagnetic, hydrodynamic, and thermal processes in a reverberatory furnace with liquid metal vortex flow chamber attached to it. The metal flow in the vortex chamber was induced by means of the arc inductor. From the comparison of two designs, it was concluded that at the tangential connection of the pressure channel, the temperature uniformity in the furnace volume was obtained, while at $\theta = 45^\circ$, the velocity and temperature distribution in the vortex flow chamber was better.

Бібл.8, рис. 6.

Ключові слова: відбивна плавильна піч, вихрова камера, дуговий індуктор, рідкий метал, гідродинаміка та теплообмін, вихровий рух, комп'ютерне моделювання.

J – густина електричного струму;

B – індукція магнітного поля;

f – питома електромагнітна сила;

u – швидкість;

ρ – густина рідкого металу;

P – статичний тиск;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

C_p – питома теплоємність;

T – температура;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

q – внутрішні джерела теплоти;

t – час;

θ – кут приєднання натискного каналу.

Індекси:

eff – ефективний параметр;

av – середній;

t – турбулентний.

Вступ.

Проблема переплавлення алюмінію в Україні є особливо актуальною через відсутність первинного виробництва цієї сировини в країні. Для отримання алюмінію та його сплавів у таких випадках залучають вторинний алюміній, який отримують у результаті переплавки металевих відходів (брухту). Часто для цього використовують відбивні печі, тобто печі з верхнім поверхневим нагріванням, які можуть бути електричними (печі електроопору), або полум'яними (паливними, газовими). Металеві відходи, особливо левовагові відходи (металева стружка тощо) перед завантаженням у такі печі попередньо компактуються (брикетуються). Але внаслідок відносно малої маси такі брикети практично повністю знаходяться (плавають) на поверхні

розплавленого металу, де, піддаючись верхньому нагріванню, значна частина металу в них окислюється та згорає [1].

Відоме цікаве рішення, яке дозволяє зменшити такі втрати при плавленні алюмінієвих відходів. Воно полягає в тому, що зазначені відходи перед плавленням не брикетують а, навпаки, подрібнюють, а потім подають у вихровий потік рідкого металу («vortex flow»), створений в окремій приєднаній до печі циліндричній камері [2]. Подрібнена шихта затягується у воронку вихрового потоку, занурюється в розплав і подається далі в плавильну ванну печі.

Вихровий потік рідкого металу в такій системі створюється відцентровим електромеханічним насосом. Цей насос окрім створення вихрової воронки забезпечує

також циркуляцію металу в печі, тобто здійснює перемішування розплаву у ванні і подачу нагрітого в ній металу до вихрової камери, забезпечуючи таким чином ефективне плавлення алюмінієвої шихти. Проте наявність механічного насоса знижує надійність і довговічність такого конструктивного рішення, через знаходження його ротора (лопатеї) у агресивному середовищі рідкого металу.

В Інституті електродинаміки НАН України задля подолання цієї проблеми запропоновано замість електромеханічного насоса використати індукційну електромагнітну систему у вигляді дугового індуктора (дугового статора), що охоплює зовні циліндричну вихрову камеру. На рис. 1 наведено схему відбивної плавильної печі з циліндричною камерою, в якій за допомогою такого індуктора створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Циліндрична камера за допомогою двох каналів (натискного і всмоктувального) з'єднана з основною камерою (ванною) печі. Змінюючи кут, під яким ці канали стикаються з циліндричною поверхнею бокової стінки вихрової камери, можна за потребою змінювати співвідношення між витратою рідкого металу, що поступає з камери у ванну печі, і витратою металу, котрий циркулює (обертається) у вихровій камері, створюючи таким чином необхідну воронку.

У роботі [3] для такої установки на основі моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів проведена попередня оцінка гідродинамічної ефективності представленої електромагнітної системи в залежності від кута, під яким натискний канал приєднується до бокової стінки вихрової камери. В ній показано, що переміщуючи циліндричну камеру відносно цього каналу, можна регулювати співвідношення між витратою металу, що надходить з камери до ванни печі, та витратою металу, який циркулює у вихровій камері.

Оскільки вихрова камера з таким індуктором служить і для перемішування розплаву у ванні печі, то оцінити ефективність такої системи можна також не тільки за швидкістю (витратою) розплаву у ванні, але і за розподілом температури рідкого металу в ній. На наш погляд така оцінка є більш достовірною. При цьому вважається, що чим вища гомогенність (однорідність) розплаву у ванні печі по температурі, тим ефективнішою є електромагнітна система. Така оцінка звісно ж потребує вирішення теплової задачі.

Мета цієї роботи – на основі тривимірного моделювання гідродинамічних і теплових процесів у відбивній печі з вихровою камерою та дуговим індуктором виз-

начити тепловий стан печі, зокрема дослідити розподіл температури рідкого металу у ванні печі та вихровій камері при двох приєднаннях натискного каналу

Математична модель

Для вирішення поставленої задачі була сформульована математична модель для чисельного дослідження фізичних процесів у такій установці. Модель складається із трьох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні, гідродинамічні і теплові процеси. Вона побудована по аналогії з розробленою раніше моделлю для дослідження фізичних процесів, що протікають у відбивній плавильній печі з електромагнітним перемішувачем рідкого металу, виконаного у вигляді лінійного індуктора біжучого і пульсуючого магнітних полів. Такий індуктор приєднується до бокової стінки або дна плавильної ванни печі. Всі три частини цієї моделі описані в роботах [4-6].

Електромагнітна частина моделі у цій роботі так як і в попередніх працях описана диференціальними рівняннями відносно комплексних амплітуд векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів. Рівняння представлені у безіндукційному наближенні, тобто без урахування поля, що виникає внаслідок руху рідкого металу в магнітному полі. За результатами розрахунку (отриманими розподілами цих потенціалів) знаходяться значення диференціальних параметрів електромагнітного поля (напруженостей і індукцій магнітного і електричних полів, густини електричного струму тощо) та інтегральних параметрів електромагнітної системи, таких як напруга, струм, активна, реактивна і повна потужності, потужність тепловиділення в рідкому металі та ін., а також значення електромагнітних сил, що виникають у рідкому металі

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re} \left(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^* \right), \quad (1)$$

де $\mathbf{J}$ – комплекс густини електричного струму в рідкому металі, $\mathbf{B}^*$ – спряжений комплекс індукції магнітного поля.

Гідродинамічний процес в моделі представлено усередненою по Рейнольдсу системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії в'язкої рідини

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (3)$$

Тут $\eta_{\text{eff}} = \eta + \eta_t$, де η – коефіцієнт молекулярної динамічної в'язкості, η_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості, розрахований відповідно до прийнятої моделі турбулентності, $\mathbf{f}$ – питома електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена згідно виразу (1). Для замикання рівнянь використовувалась к-ε модель турбулентності [2].

Для опису теплових процесів в моделі використано нестационарне рівняння теплопровідності з урахуванням теплопереносу за рахунок руху розплаву:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot (-\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) = q. \quad (4)$$

Тут $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t$, де λ – коефіцієнт молекулярної теплопровідності, λ_t – коефіцієнт турбулентної теплопровідності, обумовленої турбулентними пульсаціями швидкості. Локальні значення λ_t визначаються відповідно до виразу

$$\lambda_t = \eta_t \frac{C_p}{Pr_t} \quad (5)$$

де Pr_t – турбулентне число Прандтля, розподіл якого визначається відповідно до відомих моделей, або задається константною. Значення турбулентного числа Прандтля для рідких металів приблизно складає $Pr_t = 1,0$.

Представлена математична модель реалізована в програмному середовищі COMSOL Multiphysics [7].

Постановка задачі

Розглядалася відбивна піч для плавлення алюмінію з вихровою камерою та дуговим індуктором, схема якої з позначеннями основних розмірів наведена на рис. 1. Довжина і ширина плавильної ванни печі – $L = 3$ м, $B = 2$ м; висота металу у ванні 0,5 м. Внутрішній діаметр вихрової камери – $2R = 0,6$ м, розмір $l = 0,8$ м, відстань між каналами у ванні $b = 1$ м, ширина каналів 0,15 м. Висота металу в камері і в каналах така як і в плавильній ванні, тобто складає 0,5 м.

Шестиполіусний індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Моделювання електромагнітного поля, яке він створює, проводилося на частоті 50 Гц при заданих ампер-витках в котушках, амплітудні значення яких в кожній із них складали по 20 кА. Фазовий кут між струмами сусідніх котушок прийнято рівним 60 ел. град. При такому живленні індуктор створює в камері біжуче (обертове) магнітне поле, яке і визиває обертальний вихровий рух рідкого металу.

При моделюванні гідродинамічного процесу не враховувалася деформація вільної поверхні (меніск) рідкого металу, тобто ця поверхня задавалася плоскою.

Для оцінки теплового стану такої установки моделювалася наступна ситуація. Нагрівання рідкого металу зазначеного об'єму відбувалося у ванні печі. Розплавлений метал нагрівався тепловим потоком загальною потужністю 600 кВт, що надходив рівномірно через верхню поверхню ("дзеркало") металу.

Інтенсивність нагрівання на поверхні при цьому складала 100 кВт/м². За початкову температуру розпла-

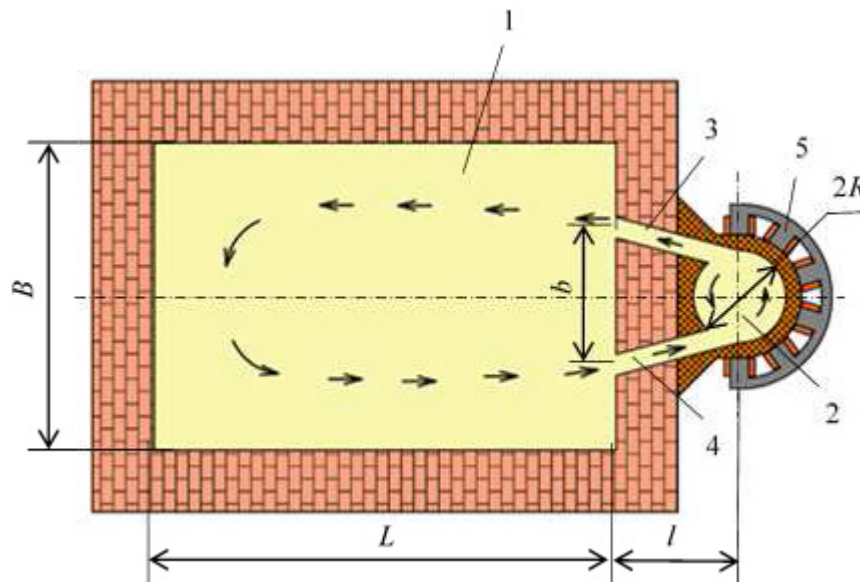


Рис. 1. Відбивна піч з вихровою камерою та дуговим індуктором (1 – ванна печі, 2 – вихрова камера, 3 – натискний канал, 4 – всмоктувальний канал, 5 – дуговий індуктор)

ву приймалася температура плавлення алюмінію, тобто 933 K (660°C). Початковий розподіл температури стінок печі визначався шляхом попереднього розрахунку стаціонарної теплової задачі з заданою температурою внутрішніх поверхонь стінок, що дорівнює початковій температурі розплаву.

На стінках установки були задані втрати тепла від контакту з зовнішнім середовищем при температурі 20°C. Розрахунок як стаціонарної, так і нестационарної теплових задач проводився в лінійній постановці – коефіцієнти рівняння теплопровідності приймалися незалежними від температури.

Алгоритм моделювання прийнято таким. Спочатку розв'язувалася стаціонарна електромагнітна задача, в результаті чого було отримано розподіл електромагнітних сил у рідкому металі установки. Далі після розв'язання стаціонарної теплової задачі спільно вирішувалися нестационарні гідродинамічна і теплова задачі.

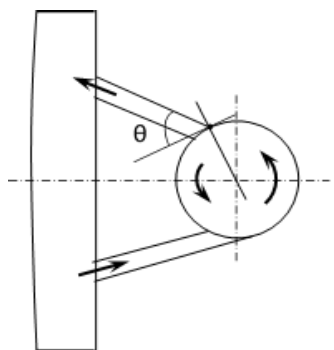


Рис. 2. Вихрова камера відбивної печі

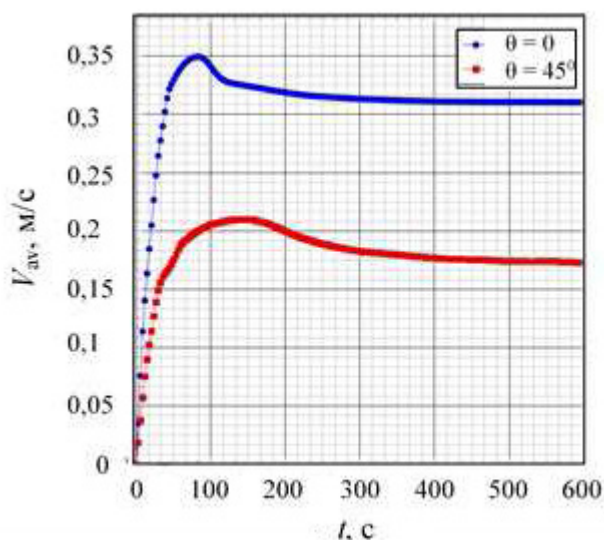


Рис. 3. Середня швидкість розплаву у ванні відбивної печі

Результати моделювання та їх аналіз

У результаті моделювання було отримано розподіли швидкості рідкого металу та температури всередині установки. Для порівняння розглядалися два випадки приєднання натискного каналу до вихрової камери: тангенційне ($\theta = 0$) та під кутом $\theta = 45^\circ$ (позначення кута показано на рис. 2).

На рис. 3 для цих двох варіантів представлено середню (осереднену по об'єму) швидкість металу V_{av} у ванні печі. Розрахунки показали, що електромагнітна система виходить на стаціонарний гідродинамічний режим приблизно за 300-400 с.

Оцінку ефективності запропонованої електромагнітної системи як перемішувача рідкого металу у відбивній печі проводили за допомогою різниці максимальної і середньої температури розплаву ΔT у ванні (рис. 4).

Після виходу установки на стаціонарний гідродинамічний режим різниця температури ΔT для варіанту з тангенційним приєднанням оказалась меншою, ніж під кутом $\theta = 45^\circ$, що дозволяє стверджувати, що таке приєднання натискного каналу забезпечує вищу ефективність електромагнітного перемішування рідкого металу у ванні печі.

На рис. 5 показано поле температури рідкого металу в середній по висоті металу площині на момент часу нагрівання $t = 400$ с, стрілками зображено рух рідкого металу. Видно, що одноконтурний рух всередині ванни утворює в центрі печі застійну зону з підвищеною температурою розплаву. Для варіанта з кутом $\theta = 45^\circ$ ця тем-

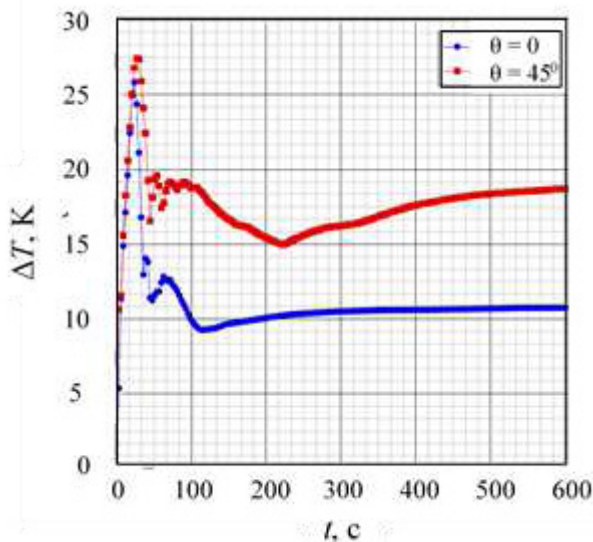


Рис. 4. Різниця максимальної та середньої температури розплаву у ванні відбивної печі

пература є вищою. Окрім того, в цьому випадку у ванні печі біля всмоктувального каналу появляється ще одна зона з підвищеною температурою.

Важливо також для такої установки оцінити розподіл температури у вихровій камері, адже саме в цю камеру подається подрібнена шихта та здійснюється попередній підігрів її перед подачею у плавильну ванну печі [8]. Температурне поле в перерізі вихрової камери між натискним і всмоктувальним каналами, отримане у результаті моделювання, наведено на рис. 6. На периферії біля бокової стінки камери можна помітити «гарячі» зони, що є свідченням того, що підігрів шихти в такому закрученому потоці цілком можливий. Більші значення температури досягаються у другому випадку, тобто при $\theta = 450$. У верхній частині камери в обох випадках біля поверхні рідкого металу помітне падіння температури, але в даному випадку це може бути результатом спрощеного представлення моделі, оскільки в ній не враховується утворення меніску (воронки) у вихровій камері.

Кутова швидкість руху рідкого металу у вихровій камері після виходу установки на стаціонарний робочий режим склала: 0,63 об/с для тангенційного приєднання натискного каналу та приблизно 1 об/с для кута 45^0 . Це означає, що у другому випадку висота (глибина) воронки та її всмоктувальна дія будуть більшими.

Таким чином, з точки зору функціонування вихрової камери (для утворення воронки) другий варіант приєднання натискного каналу є більш прийнятним. Остаточна рекомендація в практичному плані по цьому куту може бути прийнята після проведеного моделювання такої установки з врахуванням меніску у вихровій камері. Скоріш за все це буде проміжне значення кута приєднання у межах $0 < \theta < 45^0$, котре дозволить забезпечити необхідне для вирівнювання температури переміщення розплаву у ванні відбивної печі, а також ефективного занурювання твердої шихти в рідкий метал у вихровій камері.

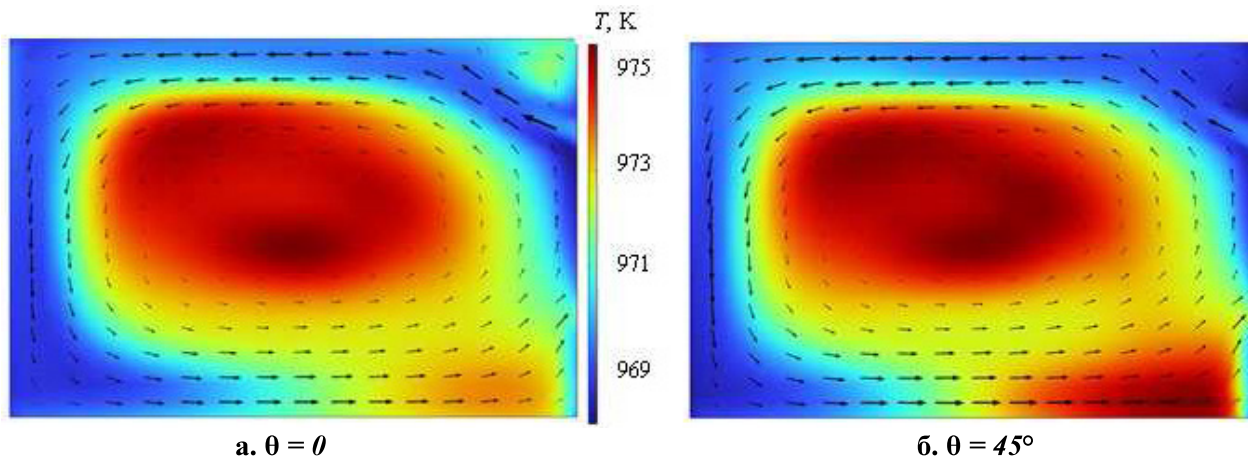


Рис. 5. Розподіл температури розплаву в середньому перерізі по висоті ванни відбивної печі

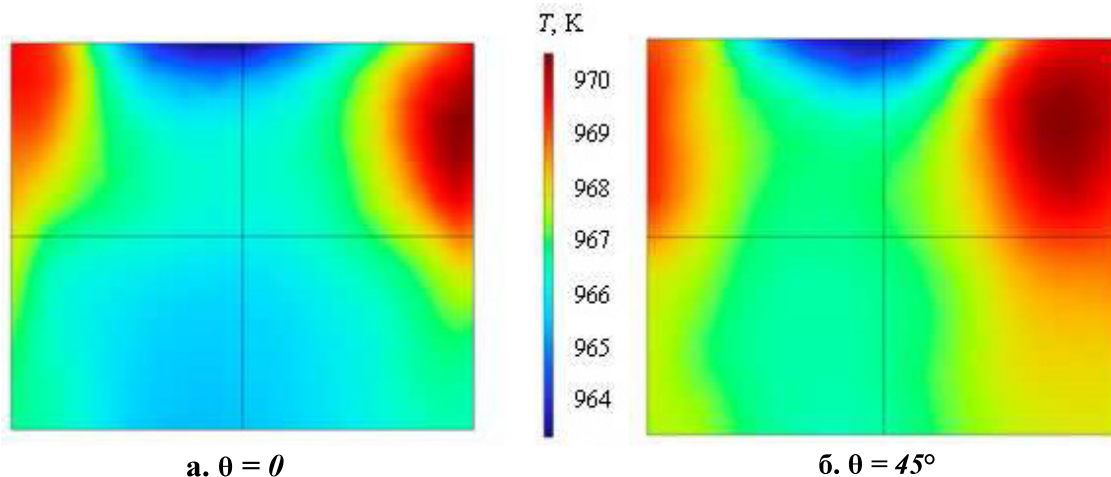


Рис. 6. Розподіл температури розплаву в вертикальному перерізі вихрової камери

Висновки

1. Для відбивної плавильної печі з вихровою камерою та дуговим індуктором побудовано математичну модель мультифізичної задачі в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics. Проведене комп'ютерне моделювання взаємозалежних фізичних процесів в печі для плавлення алюмінію, що дозволило визначити її основні гідродинамічні і теплові параметри.

2. Визначено вплив кута приєднання натискного каналу до циліндричної вихрової камери на роботу відбивної печі. Установлено, що з точки зору перемішування металу у ванні печі кращим є тангенційне приєднання каналу до бокової стінки камери, а з точки зору функціонування вихрової камери кращим є кут приєднання у 45° . Остаточна рекомендація по цьому куту може бути прийнята після проведеного додаткового моделювання гідродинамічних процесів із урахуванням меніску на вільній поверхні вихрової камери, що складає окрему задачу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Stal R., Hanley P.* Electromagnetic stirring in aluminum ladles. – ABB Value Paper., 2009.
2. *Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C.* Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metaullics lotuss system. Proceedings of the TMS Annual Meeting, 2009.
3. *Модельювання електромагнітної системи вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі / І.М. Єлісєєв, Т.О. Пеньковий, Т.В. Доник, А.А. Халатов // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 118-121.*
4. *Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В.* Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов. Технічна електродинаміка. 2013. №5. С.77-84.
5. *Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkii A.I., Fikssen V.N.* Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. Proc. of the 8-th Inter. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 605-608.
6. *Глухенький О.І., Гориславец Ю.М., Бондар О.І.* Моделювання нагрівання металевого розплаву у відбивній печі при електромагнітному перемішуванні. Технічна електродинаміка. 2015. №6. С. 78-83.
7. *COMSOL Multiphysics.* Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 26.04.2022).
8. *Gelfgat Yu, Skopis M., Grabis J.* Electromagnetically driven vortex flow to introduce small solid particles into liquid metal. Magnetohydrodynamics, vol. 41, no. 3, 2005, p. 249-254.

SIMULATION OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES IN A REVERBERATORY FURNACE WITH A VORTEX FLOW CHAMBER

Penkovyi T.O.^{1,3}, Khalatov A.A.^{1,2}, Gorislavets Y.M.³,

¹*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine*

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

³*Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 56 Peremohy Avenue, Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.10>

The problem of aluminum recycling in the Ukraine is particularly important problem due to the lack of primary production of the raw material in the country. Therefore for the aluminum production the reverberatory furnaces are used. The interesting solution, allowing reduce the amount of metal burned on the surface of liquid metal during melting. For this purpose, lightweight metal is grinded and then is melted in the vortex flow of liquid metal.

The disadvantage of existing system with vortex flow of metal is application of the centrifugal mechanical pump, reducing the reliability and service life of existing designs due to the pump blades operation in an aggressive environment of liquid metal.

To overcome this problem, the six-pole arc inductor was proposed to be used in the design. This paper provides a comparative analysis of two structural designs of the reverberatory furnace with an attached chamber of metal vortex. The driving force for a metal flow is created by a six-wave arc inductor.

The design efficiency was evaluated by the temperature difference between the maximum and average temperatures in the main part of the furnace bath. The option that provided the smallest temperature difference was considered as the best one. The angular speed of a liquid metal in the vortex chamber, which ensures the suction of grinded particles into the liquid metal volume, where their melting takes place, was also taken into account.

From the results of two designs comparison, the conclusion was made for tangential connection of the pressure channel ($\theta = 0$), the best temperature uniformity was obtained in the furnace volume while at $\theta = 45^\circ$ the best velocity and temperature distribution in the vortex chamber was occurred.

For a more detailed assessment of two designs simulation taking into account the formation of a meniscus on free surface of the liquid metal should be taken into account.

References 8, pic. 6.

Key words: electromagnetic stirrer, reverberatory furnace, liquid metal, hydrodynamics and heat transfer, vortex flow, computer modeling.

1. *Stal R., Hanley P.* Electromagnetic stirring in aluminum ladles.—ABB Value Paper., 2009.

2. *M. Bright, F. Ilinca, J.-F. Hetu, F. Ajersch, C. Saliba, C. Vild,* Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metallic lotuss system, in: Proceedings of the TMS Annual Meeting, 2009.

3. *I. Yeliseiev, T. Penkovyi, T. Donnyk, A. Khalatov.* Electromagnetic system of vortex circulating flow of liquid metal for reverberatory furnace // Theoretical and applied problems of physics, mathematics and computer science.- Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute- P. 118 – 121.

4. *Glukhenkii A.I., Gorislavets Y.M., Tokarevsky A.V.* Three-dimensional modeling of a single-phases electromagnetic stirrer of liquid metals. Technical electrodynamics. 2013. №5. P. 77-84.

5. *Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkii A.I., Fiksen V.N.* Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields // Proc. of the 8-th Inter. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 605-608

6. *Hluhenkyi O.I., Horislavets Yu.M., Bondar O.I.* Modeling of heating of a metal melt in a blast furnace with electromagnetic stirring. Technical electrodynamics. 2015. №6. P. 78-83.

7. *COMSOL Multiphysics.* Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 26.04.2022).

8. *Gelfgat, Yu, Skopis, M., Grabis, J.* Electromagnetically driven vortex flow to introduce small solid particles into liquid metal. // Magnetohydrodynamics, vol. 41, no. 3, - 2005- p. 249-254.

Отримано 16.01.2023

Received 16.01.2023

УДК 621.039

ПІДХОДИ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ТЕРМОАКУСТИЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ В НЕРІВНОВАЖНОМУ ДВОФАЗНОМУ ТЕПЛОНОСІЇ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Кондратюк В.А.¹, кандидат технічних наук, **Скалозубов В.І.²**, доктор технічних наук,
Комаров Ю. О.³, доктор технічних наук, **Косенко С.І.⁴**, кандидат технічних наук,
Коньшин В.І.⁵, кандидат технічних наук

¹ Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, E-mail: prorektor-agr@kpi.ua

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>

² Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>

³ Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: odessakomarov@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4696-6551>

⁴ Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: skosenko@op.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>

⁵ Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, E-mail: vikonshin@meta.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.11>

Виникнення термоакустичної нестійкості в нерівноважному двофазному потоці теплоносія може істотно впливати на надійність і цілісність внутрішньокорпусних пристроїв ядерного реактора. На даний час актуальним питанням є розробка адекватних та обґрунтованих методів моделювання термоакустичної нестійкості в активній зоні ядерного реактора. Для умов перехідних і аварійних режимів ядерних енергоустановок із ВВЕР більш обґрунтованим є термодинамічний підхід визначення умов виникнення термоакустичної нестійкості нерівноважного двофазного теплоносія. Він заснований на закономірностях умов виникнення коливальних процесів при акустичних обуреннях термодинамічних параметрів потоку теплоносія в активній зоні ядерного реактора.

The occurrence of thermoacoustic instability in the non-equilibrium two-phase flow of the coolant can significantly affect the reliability and integrity of the nuclear reactor's internal devices. At present, the development of adequate and justified methods for modeling thermoacoustic instability in the active zone of a nuclear reactor is an urgent issue. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant is more justified. It is based on the regularities of the conditions for the occurrence of oscillatory processes during acoustic disturbances of the thermodynamic parameters of the coolant flow in the active zone of a nuclear reactor.

Бібл. 12.

Ключові слова: термоакустична нестійкість, акустичні обурення, ядерний реактор.

Вступ. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

В перехідних і аварійних режимах ядерних енергоустановок (ЯЕУ) можуть виникати нерівноважні

двофазні потоки теплоносія в активній зоні реакторів, які є необхідною умовою виникнення високочастотної коливальної теплогідродинамічної нестійкості (ТАН — термоакустична нестійкість) Під нерівноважним дво-

фазним потоком мається на увазі режим поверхневого кипіння з конденсацією парової фази в центральній «холодній» зоні прохідного перетину теплоносія. Виникнення термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні (АЗ) реактора супроводжується високоамплітудними високочастотними навантаженнями на тепловиділяючі елементи (твели) та внутрішньо корпусні пристрої реактора. [1,2]. Це може істотно вплинути на надійність і цілісність внутрішньокорпусних конструкцій реактора (в тому числі і на твели).

Умови виникнення термоакустичної нестійкості визначаються високочастотною коливальною нестійкістю двофазних нерівноважних потоках і умовами міжфазної взаємодії в акустичних хвилях. Основна частота термоакустичних коливань тепло гідродинамічних параметрів обернено пропорційна часу проходження звукової хвилі в системі.

Експериментально встановлено, що при ТАН амплітуди коливань тиску можуть досягати 50 % від середнього значення тиску; а основна частота коливань визначається часом розповсюдження акустичних хвиль у парогенеруючому каналі.

Сучасні детерміністські коди (RELAP, СОКРАТ, CATHARE та ін.) не моделюють умови виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів [3, 4, 5, 6]. Тому актуальним питанням є розробка обґрунтованих методів моделювання умов виникнення ТАН в активній зоні реактора в перехідних і аварійних режимах.

У цій роботі представлено аналіз відомих підходів моделювання ТАН для обґрунтування адекватних методів визначення умов виникнення та способів усунення ТАН в активній зоні реакторів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] на основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів супроводжується високочастотними (сотні Герц). Також вони супроводжуються високоамплітудними коливаннями тиску (до 50 % від середнього тиску), які можуть суттєво вплинути на цілісність внутрішньо корпусних пристроїв реактора. Однак запропоновані методи моделювання умов виникнення ТАН мали загальний теоретичний характер та складні для практичного застосування. У роботі [1] також проведений аналіз відомого метода визначення умов ТАН на основі нерівноважної полідисперсної моделі двофазного потоку теплоносія запропоновано

метод визначення умов виникнення ТАН в активній зоні реактора в робочих, перехідних та аварійних режимах [2]. В результаті встановлено, що цей метод украй складний для практичного застосування під час аналізу безпеки ядерних енергоустановок. У роботі [2] також представлені численні експериментальні дані за межами області ТАН у парогенеруючих каналах у широкому діапазоні режимних параметрів (в т. ч. умови ядерних енергоустановок з ВВЕР). В результаті експериментальних досліджень встановлено: необхідною умовою ТАН в парогенеруючих каналах теплоенергетичного обладнання є режим нерівноважного («не догрітого») кипіння. При цьому пароутворення відбувається на поверхні нагрівання з конденсацією парової фази в холодному потоці теплоносія. Основна частота термоакустичних коливань визначається часом проходження акустичної хвилі в каналі. Амплітуда термоакустичних коливань досягає 50 % від середнього тиску в каналі, розвиток термоакустичних коливань походить від більш високочастотних гармонік до основної (енергетичної) гармоніки коливань. На умови виникнення термоакустичних коливань істотно впливають – розподіл тепловиділень по довжині каналу, що обігрівається, газонасиченість теплоносія та інші фактори. У роботі [7] розглянуто питання щодо умов виникнення тепло гідродинамічної нестійкості в запобіжних клапанах реакторної установки. В результаті встановлено умови виникнення аперіодичної нестійкості внаслідок трансзвукових режимів двофазних потоків теплоносія; а умови виникнення ТАН відсутні. У роботі [8] розглянуто питання умов виникнення гідродинамічної нестійкості в каналах активних систем безпеки, що забезпечують підживлення реакторної установки в аварійних режимах. Проте вплив систем безпеки на умови виникнення ТАН у роботі [8,9] не розглянуто.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробити критеріальний метод визначення умов виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів, який дозволить підвищити експлуатаційну безпеку і надасть змогу розробити оперативну систему діагностики умов ТАН в активній зоні реакторних установок великої потужності.

Для досягнення поставленої мети встановлено завдання розробки математичної моделі оперативного способу визначення умов виникнення ТАН.

4 Аналіз підходів моделювання умов ТАН

На даний час сформовано два основних теоретичних підходи обґрунтування умов виникнення ТАН у парогенеруючих каналах [7,10]:

резонансний підхід, заснований на резонансному ефекті співпадіння частоти акустичних обурень ω_a і частоти імпульсів тиску при конденсації парових пазирів ω_R :

$$\omega_a = \omega_R; \quad (1)$$

термоакустичний підхід, заснований на термодинамічних закономірностях умов виникнення коливальних процесів при змінах тиску і маси в системі.

Умови обґрунтованості вказаних підходів розглянемо на прикладі системи з одиночного парового пазиря, що конденсується в об'ємі відносно «холодної» рідини.

Рівняння тепломасообміну в розгляданій системі:

$$\frac{d(\rho_v V_b)}{dt} = -G_c; \frac{dM_l}{dt} = G_c; \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho_v V_b i_v)}{dt} = -G_c i_{vl}; G_c = \frac{\alpha F_b (T_v - T_l)}{i_{vl}}, \quad (3)$$

де t — час; ρ_v — щільність пари; V_b, F_b — об'єм і площа поверхні пазиря; M_l — маса «холодної» рідини; i_v, i_{vl} — питома ентальпія пари і фазового переходу конденсації; α — коефіцієнт тепловіддачі на поверхні пазиря; T_v, T_l — температура пари і «холодної» рідини.

Після перетворення рівнянь (2) та (3) отримаємо систему рівнянь:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{G_c i_l}{(i_v a_v^{-2} - \frac{d\rho_v i_v}{dP}) V_b} = f_p, \quad (4)$$

$$\frac{dV_b}{dt} = -\frac{G_c i_l + i_v a_v^{-2} f_p V_b}{\rho_v} = -f_b, \quad (5)$$

$$\frac{dM_l}{dt} = G_c, \quad (6)$$

$$P(t=0) = P_{l0}; V_b(t=0) = V_{b0}; M_l(t=0) = M_{l0}; V_b(t=\omega_R^{-1}) = 0. \quad (7)$$

Наближене консервативне рішення системи рівнянь (4), (5) та (7):

$$\omega_R \approx f_{b0}/V_{b0}, \quad (8)$$

$$P_l(t=\omega_R^{-1}) \approx P_{l0} + f_{p0} V_{b0}/f_{b0}. \quad (9)$$

Тоді умова (1) резонансного ефекту ТАН:

$$a_{vl}/L \approx f_{b0}/V_{b0}. \quad (10)$$

де a_{vl} — швидкість звуку в системі і в парі; L — приведений розмір системи.

З урахуванням $P_{l0} V_{b0} \approx P_a V_{ba}$ ($P_a = 0,1$ МПа) умови резонансного ефекту виникнення ТАН (10):

$$L \approx \frac{a_{vl} V_{ba} P_a}{P_{l0} f_{b0}}. \quad (11)$$

Аналіз отриманої залежності (11) визначив, що при $P_{l0} \gg P_a$ та $T_v - T_l \ll 50^\circ\text{K}$ умова резонансного ефекту ТАН виконується для системи з $L \ll 1,0$ м.

У форматі акустичних обурень тиску $\delta P \ll P_{l0}$ рівняння (4) та (6):

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\partial f_p}{\partial P} \delta P, \quad (12)$$

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\partial G_c}{\partial P} \delta P. \quad (13)$$

У рамках термодинамічного підходу умови виникнення ТАН, у системі що розглядається, «паровий пазир — рідка фаза» [10]:

$$\frac{\frac{d\delta P}{dt}}{\frac{d\delta M_l}{dt}} = \frac{\frac{\partial f_p}{\partial P}}{\frac{\partial G_c}{\partial P}} > 0. \quad (14)$$

Таким чином, перспективні методи визначення умов виникнення ТАН у перехідних і аварійних режимах ЯЕУ з ВВЕР повинні ґрунтуватися на термодинамічному підході.

5. Обговорення результатів розрахункового моделювання

Розроблено математичну модель оперативного способу визначення умов ТАН у двофазному нерівноважному потоці теплоносія, яка на відміну від відомих підходів [9,11,12] враховує вплив акустичних коливань тиску та низькочастотних флуктуаційних коливань витрати на умови виникнення ТАН.

На основі розробленої математичної моделі представлено критеріальний метод визначення умов ТАН в активній зоні ВВЕР.

На основі термодинамічного підходу отримано умови термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактора. Вони залежать від визначальних термодинамічних параметрів — потужність реактора, витрати теплоносія, тиску та температури теплоносія на вході та виході з активної зони. Всі зазначені параметри

контролюються штатною системою реакторного контролю ВВЕР. Встановлено, що в номінальному режимі роботи реактора теплоносії є стійким щодо термоакустичних коливань. Умови термоакустичної нестійкості можуть виникнути, наприклад, при заклинюванні декількох головних циркуляційних насосів.

Оперативні системи діагностики ЯЕУ не призначені для визначення та усунення умов ТАН в активній зоні ядерних реакторів. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності достатньо обґрунтованих методів моделювання умов виникнення ТАН у активній зоні реакторних установок.

Представлений термодинамічний метод моделювання умов виникнення ТАН може бути основою для розробки відповідної оперативної системи діагностики реакторної установки типу ВВЕР, а також адаптований до реакторних установок

Висновки

1. Виникнення термоакустичної нестійкості в нерівноважному двофазному потоці теплоносія може істотно впливати на надійність і цілісність внутрішньокорпусних пристроїв ядерного реактора (в тому числі і твелів).

Сучасні детерміністські коди не моделюють умови виникнення термоакустичної нестійкості. Тому актуальним питанням є розробка адекватних та обґрунтованих методів моделювання термоакустичної нестійкості в активній зоні ядерного реактора.

2. На основі проведеного аналізу відомого резонансного підходу моделювання умов виникнення термоакустичної нестійкості (на прикладі одиночного пузиря, що конденсується) встановлено, що резонансні ефекти співпадіння частоти розповсюдження акустичних хвиль і частоти конденсації парових пузирів можуть бути значущими для відносно коротких каналів (менших за 1 м) при відносно низьких тисках.

3. Для умов перехідних і аварійних режимів ядерних енергоустановок із ВВЕР більш обґрунтованим є термодинамічний підхід визначення умов виникнення термоакустичної нестійкості нерівноважного двофазного теплоносія, заснований на закономірностях умов виникнення коливальних процесів при акустичних обуреннях термодинамічних параметрів потоку теплоносія в активній зоні ядерного реактора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС (Москва: Энергоатомиздат, 1992), 432 с.

2. Коврижский Ю.Л., Емельяненко Е.З., Скалозубов В.И. Пределы безопасной эксплуатации установок в отношении термоакустической неустойчивости теплоносителя в активной зоне. Ядерная та радіаційна безпека 1 (1998), 123-129.

3. Дем'янов В.М., Шугайло О.П., Мустафін М.А., Макаренко М.В. Оцінка цілісності обладнання та трубопроводів АС на основі пов'язаних розрахунків в ANSYS і RELAP CODE. Ядерная та радіаційна безпека №3(87) (2020). С. 46-54.

4. Шараевский Г.И. Проблемы підвищення показників надійності розрахункового визначення кризи тепловіддачі у водоохолоджуваних реакторах на базі комп'ютерних теплогідрравлічних кодів. Ядерная та радіаційна безпека №3(79) (2018). С. 46-54.

5. Мазурок А.С., Алексеев Ю.П., Крушинский А.Г., Корницкий А.В. Валидация теплогидравлической модели реакторной установки с детальной разбивкой опускаемого участка для анализа термических нагрузок на корпус реактора Nuclear & Radiation Safety. 2019. No.1(81). P.42—45. Ядерная та радіаційна безпека. 2012. № 1(53). С.16—21.

6. Грищенко Б. Ю., Полянский М. А., Севбо А. Е., Семенюк И. А. Применение вероятностных методов анализа безопасности АЭС при исследовании нарушения хрупкой прочности корпуса реактора. Ядерная та радіаційна безпека. 2013. № 1(57). С. 22—25.

7. Скалозубов В.И. та інш. Гідродинамічні удари в обладнанні ядерних енергоустановок при трансзвукових режимах течії парорідинних потоків. Ядерная та радіаційна безпека. № 2(82) (2019). С. 46-49.

8. Скалозубов В.И. та інш. Аналіз критичних умов надійності при гідроударах в активних системах безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000. Ядерная та радіаційна безпека. № 1(81) (2019). С. 42-45.

9. Вышемирский М. П., Мазурок А. С., Носовский А. В. Анализ влияния начальных и граничных условий на формирование теплоудара корпуса реактора. Ядерная та радіаційна безпека. 2013. № 1(57). С. 26—30.

10. Научно-технические основы заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України. Під редакцією академіка О.О. Ключникова. Чорнобиль, 2012, 296с.

11. I. Sharaievskii, N. Fialko, A. Nosovsky, L. Zimin, G. Sharaievskii. Actual problems of thermal physics of design and severe accidents of nuclear power units. Nuclear & Radiation Safety №2(70) (2016) P. 32-36.

12. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. SARnet 17, Budapest, Hungary, April 1-11, 2008.

APPROACHES TO MODELING CONDITIONS OF THERMOACOUSTIC INSTABILITY IN NON-EQUILIBRIUM TWO-PHASE COOLANT OF NUCLEAR REACTORS

Kondratyuk V.A.¹, Skalozubov V.I.², Komarov U.O.², Kosenko S.I.², Konshin V.I.¹

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

Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637

² Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology Sector of National Academy of Sciences of Ukraine, Odessa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine
Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.11>

The occurrence of thermoacoustic instability in the non-equilibrium two-phase flow of the coolant can significantly affect the reliability and integrity of the nuclear reactor's internal devices. At present, the development of adequate and justified methods for modeling thermoacoustic instability in the active zone of a nuclear reactor is an urgent issue. The purpose of the study is to develop a criterion method for determining the conditions for the occurrence of TAN in the active zone of nuclear reactors, which will increase operational safety and provide an opportunity to develop an operational system for diagnosing the conditions of TAN in the active zone of high-power reactor installations. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant is more justified. Based on the thermodynamic approach, the conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactor were obtained. They depend on the defining thermodynamic parameters— reactor power, coolant consumption, pressure and temperature of the coolant at the entrance and exit of the active zone. It was established that in the nominal operating mode of the reactor, the coolant is stable with respect to thermoacoustic fluctuations. Based on the analysis of the well-known resonance approach to modeling the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability (on the example of a single condensing bubble), it was established that the resonance effects of the coincidence of the frequency of propagation of acoustic waves and the frequency of

condensation of steam bubbles can be significant for relatively short channels (less than 1 m) at relatively low pressures. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant, based on the regularities of the conditions for the occurrence of oscillatory processes during acoustic perturbations of the thermodynamic parameters of the coolant flow in the active zone of a nuclear reactor, is more justified.

References 12.

Key words: thermoacoustic instability, acoustic disturbance, nuclear reactor.

1. Gerliga V., Skalozubov V. Bubble boiling flows in the power equipment of nuclear power plants (Moscow: Energoatomizdat, 1992) 432 p.

2. Kovrizhkin Yu., Emelianenko E., Skalozubov V. The limits of safe operation of facilities in relation to thermoacoustic instability of the coolant in the core. Nuclear & Radiation Safety 1 (1998) 123-129. (Rus).

3. V. Diemienkov, O. Shugailo, M. Mustafin, M. Makarenko. Assessment of the integrity of the equipment and pipelines of the AS based on related calculations in ANSYS and RELAP CODE. Nuclear & Radiation Safety 3(87) (2020) 46-54.

4. G. Sharaevsky. Problems of increasing the reliability of the calculated determination of the heat transfer crisis in water-cooled reactors based on computer thermohydraulic codes. Nuclear & Radiation Safety 3(79) (2018) 46-54

5. A. Mazurok, J. Alekseev, A. Krushynskyy, A. Kornyskyi. Validation of the thermal-hydraulic model of the reactor plant with a detailed breakdown of the downcomer section for the analysis of thermal loads on the reactor pressure vessel Nuclear & Radiation Safety. 2012. No. 1(53). P. 16-21 .

6. B. Gryschenko, M. Polyanskyi, O. Sevbo, I. Semenyuk. Application of probabilistic methods for NPP safety analysis in the study of violations of the brittle strength of the reactor pressure vessel. Nuclear & Radiation Safety. 2013. № 1(57). P. 22—25.

7. Skalozubov V. et al. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. Nuclear & Radiation Safety 2(82) (2019) 46-49.

8. Skalozubov V. et al. Analysis of Reliability-Critical Hydraulic Impact Conditions at WWER-1000 NPP Active Safety Systems. Nuclear & Radiation Safety 1(81) (2019) 42-45.

9. Vyshemirskiy M., Mazurok A., Nosovsky A. Influence of initial and boundary conditions on the formation of reactor pressure vessel thermal shock. Nuclear & Radiation Safety 1(57) (2013) 26-30. (Rus).

10. *Scientific and technical* basis of measures to improve the safety of NPPs with VVER. Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. Under the editorship of Academician O. Klyuchnikova, Chernobyl. 2012, 296 c.

11. *I. Sharaievskii, N. Fialko, A. Nosovsky, L. Zimin, G. Sharaievskii.* Actual problems of thermal physics of design and severe accidents of nuclear power units. Nuclear & Radiation Safety №2(70) (2016) P. 32-36.

12. *Sauvage E., Musoyan G.* Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. SARnet 17, Budapest, Hungary, April 1-11, 2008.

Отримано 03.01.2023

Received 03.01.2023