

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 44, № 2, 2022

Головний редактор – Сисєжкін Ю.Ф.

Редакційна колегія:

Долінський А.А. – почесний головний редактор
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

Авраменко А.О., Ковецька М.М., Тирінов А.І.,
Кондратьєва О.О., Олійник Л.В.

Плівкове кипіння рідини біля вертикальної пластини в
пористому середовищі5

Мулярчук М.А., Халатов А.А., Коваленко Г.В.

Теплогідравлічна ефективність одно- та дворядного
пучка циліндрів зі спіральною канавкою на
зовнішній поверхні при поперечному обтіканні
потокм повітря12

Адєєва Л.Ю., Павлик В.Ю.

Дослідження впливу ефектів гідродинамічної кавітації
на властивості складних багатокомпонентних систем..21

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

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

Аналіз заходів для повної відмови України від
російського природного газу29

Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І.

Аналіз успішних прикладів виробництва теплової
енергії з агробіомаси в Європі38

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

Досвід країн ЄС з розвитку відновлюваної енергетики та
скорочення споживання природного газу47

Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І.

Перспективи використання біопалив другого покоління
як авіаційного палива54

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

Можливості скорочення і заміщення споживання
природного газу в централізованому теплопостачанні
України64

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Халатов А.А., Борисов І.І., Кулішов С.Б.

Розвиток систем плівкового охолодження лопаток
газових турбін (Огляд)70

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

Підвищення ефективності комбінованих
теплоутилізаційних систем котельних установок84

Кобзар С.Г., Халатов А.А.

Вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними
газами на екологічні та технологічні показники котла
ТПП 312 при його роботі на понижених
навантаженнях92

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 44, № 2, 2022

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

A. Avramenko – Associated Editor

B. Basok

A. Dolinsky – Honorable Editor

L. Vorobiov

V. Gorobec

L. Dekusha

V. Eremenko

V. Klimenko

P. Krukovsky

S. Kudrya

Y. Kuts

M. Myslovych

Ye. Pysmennyi

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

**Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Tyurin A.I.,
Kondratieva E.A., Oliinyk L.V.**

Film boiling of a liquid on a vertical plate in a porous
medium5

Mulyarchuk M.A., Khalatov A.A., Kovalenko G.V.

Thermal hydraulic efficiency of one and two-row bunch
of cylinders with a spiral groove on the outer surface with
transverse flow12

Avdieieva L.Yu., Pavlyk V.Yu.

The study of the influence of hydrodynamic cavitation
effects on the properties of complex multicomponent
systems21

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

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

Analysis of actions for Ukraine to completely reject Russian
natural gas29

Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I.

Analysis of successful cases of heat production from
agrobiomass in Europe38

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

Experience of EU countries in developing renewable
energy and reducing natural gas consumption.....47

Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I.

Prospect for the use of second generation biofuels as jet
fuel54

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

Opportunities for reduction and replacement of natural gas
consumption in district heating of Ukraine64

CURRENT SITUATION AND PROSPECTS OF RENEWABLE ENERGY USE IN THE TRANSPORT SECTOR

Khalatov A.A., Borisov I.I., Kulishov S.B.

Development of turbine blade film cooling systems
(the review)70

**Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I.,
Presich G.O.**

Improving the efficiency of complex heat recovery systems
of boiler plants84

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

The effect of replacement of part of the coal dust by
pyrolysis gases on the environmental and technological
performance of the boiler TPP 312 during its operation at
low loads92

УДК 532.536

ПЛІВКОВЕ КИПІННЯ РІДИНИ БІЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПЛАСТИНИ В ПОРИСТОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М., канд. техн. наук,
Тирінов А.І., докт. техн. наук, Кондратьєва О.О., канд. техн. наук, Олійник Л.В.



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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.1>

Наведено результати моделювання теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі на вертикальній нагрітій стінці. Аналітичне рішення задачі отримане з використанням моделі пористого середовища в наближенні Дарсі-Брінкмана.

The paper presents results of the modeling of heat transfer at film boiling of a liquid in a porous medium on a vertical heated wall. An analytical solution was obtained for the problem using the porous medium model in the Darcy-Brinkman

Бібл. 17, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: теплообмін, плівкове кипіння рідини, пористе середовище.

c_p – теплоємність при постійному тиску;
 g – гравітаційне прискорення;
 G – масова витрата;
 k – теплопровідність;
 K – проникність;
 L_v – теплота пароутворення;
 p – тиск;
 q – тепловий потік;
 T – температура;
 u – x -компонента швидкості;
 μ – динамічна в'язкість пари;
 ρ – густина пари;
 $\Delta\rho$ – різниця густини рідини і пари;
 ϕ – пористість;

x, y – декартові координати;
 δ – товщина плівки;
 η – безрозмірна змінна;
 Ja – число Якоба;
 Nu – число Нуссельта;
 Ra – число Релея;
 Re – число Рейнольдса.

Індекси нижні:

eff – ефективний;
 s – пористе тіло;
 w – стінка;
 ∞ – за межами плівки пари;
 0 – відсутність пористого середовища.

Використання в теплообмінному обладнанні пористих матеріалів є одним з ефективних засобів інтенсифікації теплообміну в системах охолодження теплообмінного обладнання енергетичних установок, радіоелектронних приладів. Велика кількість робіт присвячена дослідженням процесів переносу в каналах з пористими структурами з примусовою конвекцією теплоносія [1]. Особлива увага приділяється використанню пористих матеріалів як інтенсифікаторів теплообміну при кипінні в теплообмінному обладнанні атомної енергетики і системах охолодження на основі теплових труб [2,3]. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу різних параметрів пористого середовища на процеси кипіння і конденсації. В роботі [3] представлені результати досліджень процесів кипіння і конденсації в пористому середовищі теплової труби на основі математичної моделі двофазної суміші. Визначе-

но вплив параметрів пористого тіла на теплообмінні процеси. Результати чисельного моделювання тепломасопереносу при кипінні в пористому середовищі на основі моделі двофазної суміші з урахуванням і без врахування локальної термічної нерівноважності представлені в роботах [4,5]. Проаналізовано вплив параметрів процесу на розподіл температури і насичення. Показано, що тепловий потік, число Рейнольдса і теплопровідність твердої фази сильно впливають на початок і завершення процесу фазового переходу, в той час як вплив пористості незначний. В роботі [6] показано, що враховувати термічну нерівноважність при моделюванні теплообміну в двофазних потоках в пористому середовищі необхідно при високих теплових потоках і високих швидкостях. Результати моделювання процесів тепломасопереносу при плівковому кипінні рідини біля стінки, що нагрівається, надано в роботах [7-9].

Розгінна течія в мікроканалах проаналізована в [10,11], теплообмін при течії теплоносія в криволінійному пористому каналі розглянуто в роботі [12]. Показано вплив параметрів пористого тіла та умов проковзування на стінках на інтенсивність теплообміну в мікроканалах.

Метою роботи є отримання аналітичного рішення задачі течії та теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі, що межує з нагрітою твердою стінкою; дослідження впливу різних температурних граничних умов на стінці та параметрів пористого середовища на теплообмін. Отримання аналітичного рішення задачі дає можливість аналізу особливостей теплообміну при кипінні в пористих середовищах, вказує на фізичні тенденції та полегшує параметричні дослідження.

Математична модель

Розглядається стаціонарний процес кипіння рідини біля вертикальної нагрітої стінки, що занурена в пористе середовище. Плівка пари, що утворюється біля стінки, рухається вгору в напрямку осі x (рис. 1). Товщина парової плівки δ мала порівняно з довжиною, що дозволяє моделювання плівки як прикордонного шару. Температура пари і рідини на зовнішній границі плівки T_∞ , тобто для $y = \delta$, дорівнює температурі насичення при даному тиску. Температура стінки вища, ніж температура рідини $T_w > T_\infty$. Приймається рівність температур теплоносія і пористої матриці. Теплопровідність і конвективний теплообмін в паровій плівці в потоковому напрямку є незначними, в порівнянні з теплопередачею в напрямку, ортогональному до стінки.

Стаціонарний процес течії і теплообміну в плівці біля нагрітої стінки в пористому середовищі в наближенні пограничного шару описується за допомогою модифікованої моделі Дарсі–Брінкмана–Форхаймера [13] у вигляді

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} - \frac{c_F \rho}{\sqrt{K}} u^2 = -g \Delta \rho \quad (1)$$

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = 0, \quad (2)$$

де c_F - безрозмірна константа Форхаймера.

Ця модель використовується при високих масових швидкостях теплоносія для чисел Рейнольда $Re_K > 1$, що визначені на основі середньої швидкості та проникності $Re_K = u_{av} \rho \sqrt{K} / \mu$. [13]. Така задача розглянута в роботі [14]. Розглянемо задачу у випадку малої масової швидкості теплоносія для $Re_K < 1$. За даними роботи [15], у діапазоні $Re_K < 1$ квадратичний опір (третій член) у правій частині рівняння (1) набагато менше лінійного

опору (другий член). Таким чином, рівняння руху (1) можна записати у наступній формі

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} = -g \Delta \rho, \quad (3)$$

що відповідає підходу Дарсі–Брінкмана.

Граничні умови, що розглядаються, описують стан нерухомої рідини на зовнішній межі парової плівки [16]: для постійної температури стінки

$$u = 0, \quad T = T_w \quad \text{при} \quad y = 0 \quad (4)$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при} \quad y = \delta \quad (5)$$

для постійного теплового потоку на стінці

$$u = 0, \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}}, \quad \text{при} \quad y = 0 \quad (6)$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при} \quad y = \delta \quad (7)$$

Для випадку нерухомої рідини в роботі [16] запропоновано наступне рівняння балансу маси у вигляді

$$q_w = L_v G_l, \quad (8)$$

де

$$\int_0^x G_l dx = \int_0^\delta \rho u dy, \quad (9)$$

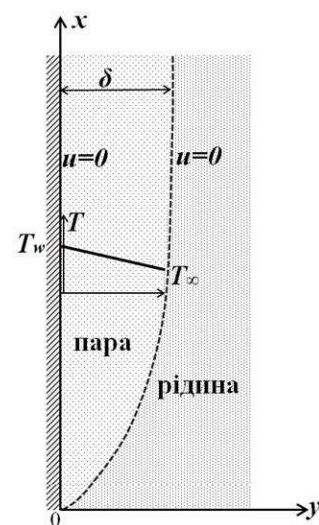


Рис. 1. Схема плівкового кипіння на вертикальній пластині

є масовою витратою теплоносія через плівку на одиницю довжини поверхні.

Загальний вигляд рішення однорідного рівняння (3) є таким

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} + C_1 \cosh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right) + C_2 \sinh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right). \quad (10)$$

У випадку нерухомої рідини з граничними умовами (4) – (7) рівняння (10) перетворюється на наступне

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\delta - 2y}{2\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{2\sqrt{K}}\right)} \right) = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}(1 - 2\eta)\right)}{\cosh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right)} \right), \quad (11)$$

де $Da = \frac{K}{\delta^2}$ – число Дарсі, $\eta = y/\delta$ – безрозмірна координата.

У цьому випадку масова витрата теплоносія становить

$$G = \int_0^\delta \rho u dy = \frac{g\rho K\Delta\rho \left(\delta - 2\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) \right)}{\mu}. \quad (12)$$

Розглянемо окремо дві граничні умови на стінці: $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$.

Гранична умова $T_w = \text{const}$

Використовуючи рівняння (8), (9) та (12), можна отримати наступне рівняння для товщини плівки пари

$$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{eff}\Delta T_{\mu x}}{gL_v K \rho \Delta\rho}, \quad (13)$$

де $k_{eff} = (1 - \phi)k_s + \phi k$, k_s – теплопровідність пористого середовища.

Лінійний профіль температури, якій задовольняє рівняння (2), дає число Нуссельта у вигляді $Nu = x/\delta$, що дозволяє отримати таке трансцендентне рівняння

$$\frac{1}{Nu^2} - \frac{2\sqrt{Da_x}}{Nu} \tanh\left(\frac{1}{2Nu\sqrt{Da_x}}\right) = \frac{1}{Da_x Ra Ja} = \frac{1}{Ra_v Ja}, \quad (14)$$

або

$$\frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh\left(\frac{S^{-1}}{2}\right) = \frac{1}{12Da_x^2 Nu_0^4}, \quad (15)$$

де

$$Ra_v = Ra Da_x, \quad S = Nu \sqrt{Da_x}.$$

Таким чином, ми маємо трансцендентне рівняння для числа Нуссельта як функції від місцевого числа Дарсі Da_x та числа Нуссельта Nu_0 , яке отримане для випадку відсутності пористого середовища [17], а саме

$$Nu_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{12} Ra Ja}. \quad (16)$$

Іншою формою трансцендентного рівняння (14) є рівняння

$$\frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh\left(\frac{1}{2MN}\right) = \frac{1}{Ja}. \quad (17)$$

де

$$M = Da_x \sqrt{Ra_v}, \quad N = Nu / \sqrt{Ra_v}.$$

Розглянемо крайні випадки малої $Da \rightarrow 0$ і великої $Da \rightarrow \infty$ проникності пористого середовища, коли можна отримати рішення рівняння (13) в замкненій формі.

Крайній випадок $Da \rightarrow 0$

Розкладення лівої частини рівняння (13) в ряд Макларена при $K \rightarrow 0$ дає

$$\delta = \sqrt{\frac{k_{eff}\Delta T_{\mu x}}{gL_v K \rho \Delta\rho}}. \quad (18)$$

У свою чергу, рівняння (18) дає змогу отримати наступне рішення для числа Нуссельта

$$Nu = \sqrt{Ra_v Ja}. \quad (19)$$

Нарешті, можна визначити відносне число Нуссельта у вигляді

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{12Da_0} = \sqrt[4]{12Da}. \quad (20)$$

Крайній випадок $Da \rightarrow \infty$

Розкладення лівої частини рівняння (13) у ряд Макларена при $K \rightarrow \infty$ дає

$$\delta^4 - \frac{\delta^6}{10K} = \frac{12k_{eff}\mu\Delta T_x}{gL_v \rho \Delta\rho} = \delta_0^4. \quad (21)$$

Зробимо заміну $\delta^2/\delta_0^2 = z$ в рівнянні (21), отримаємо

$$z^2 - \frac{z^3}{10\text{Da}_0} = 1. \quad (22)$$

Фізично значущим рішенням цього рівняння є

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{1}{10\text{Da}}}} \quad (23)$$

Що дозволяє отримати наближене рішення для чисел Нуссельта у вигляді

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{10\text{Da}}}. \quad (24)$$

В роботі [17] отримано рішення для чисел Нуссельта у випадку, коли рідина на зовнішній межі плівки пари рухається, у вигляді

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{4}{9\text{Da}}} \quad (25)$$

На рис. 2 представлено порівняння значення чисел Нуссельта, що отримані за рівнянням (24) для випадку нерухомої рідини та за рівнянням (25) у випадку рухомої рідини на межі плівки пари

У випадку нерухомої рідини, як і у випадку з рухомою рідиною, нормовані числа Нуссельта зменшуються із зменшенням числа Дарсі. Однак у випадку нерухомої рідини це зменшення слабше.

Гранична умова $q_w = \text{const}$

На основі рівнянь (8), (9) можна отримати наступне рівняння для товщини плівки пари

$$\frac{g\rho K\Delta\rho}{\mu x} \left(\delta - 2\sqrt{K} \tanh\left(\frac{\text{Da}^{-1/2}}{2}\right) \right) = \frac{q_w}{L_v}, \quad (26)$$

або

$$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{\text{Da}^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{\text{eff}}\Delta T\mu x}{gL_v K\rho\Delta\rho}. \quad (27)$$

Рівняння (27) дає можливість отримати трансцендентне рівняння для числа Нуссельта у вигляді

$$\frac{1}{\text{Nu}^2} - \frac{2\sqrt{\text{Da}_x}}{\text{Nu}} \tanh\left(\frac{1}{2\text{Nu}\sqrt{\text{Da}_x}}\right) = \frac{1}{\text{Ra}_v \text{Ja}} \quad (28)$$

Це рівняння також можна переписати у наступній формі

$$\frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh\left(\frac{S^{-1}}{2}\right) = \frac{1}{12\text{Da}_x^2 \text{Nu}_0^4}, \quad (29)$$

або

$$\frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh\left(\frac{1}{2MN}\right) = \frac{1}{\text{Ja}}. \quad (30)$$

Розглянемо два крайні випадки для малих та великих значень проникності, що дозволяють отримати рішення рівняння (30) в замкненій формі.

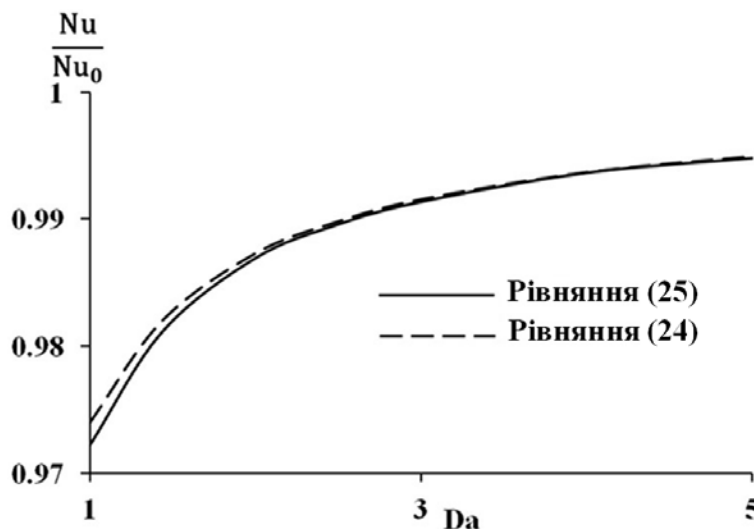


Рис. 2. Залежність нормованого числа Нуссельта від числа Дарсі

Крайній випадок $Da \rightarrow 0$

Використовуючи рівняння для товщини плівки (18) та рівняння (19) для числа Нуссельта, можна отримати вираз

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{144 Da_0} = \sqrt[3]{12^{2/3} Da} . \quad (31)$$

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{1}{10 Da}}}$$

дає можливість отримати наступне рівняння для відносного числа Нуссельта

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{1}{10 Da}} . \quad (33)$$

Крайній випадок $Da \rightarrow \infty$

Рівняння для товщини плівки у цьому випадку виглядає так

$$\delta^3 - \frac{\delta^5}{10K} = \delta_0^3 . \quad (32)$$

Аналітичне рішення задачі теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі, що отримане в рамках підходу Дарсі – Брінкмана, представлено в таблиці 1.

Дійсний корінь рівняння (32)

Таблиця 1

Величина		Нерухома рідина	
		$T_w = \text{const}$	$q_w = \text{const}$
Граничні умови на стінці		$T = T_w$ $u = 0$	$\left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = - \frac{q_w}{k_{eff}}$ $u = 0$
Граничні умови на границі парового шару		$T = T_\infty$ $u = 0$	$T = T_\infty$ $u = 0$
Профіль швидкості		$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\delta-2y}{2\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{2\sqrt{K}}\right)} \right)$	
Трансцендентне рівняння для товщини плівки		$\delta^2 - 2\delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{Da^{-1/2}}{2}\right) = \frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K\rho\Delta\rho}$	
Товщина плівки для окремих випадків	$Da \rightarrow 0$	$\delta = \sqrt{\frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K\rho\Delta\rho}}$	$\delta = \frac{q_w\mu x}{gKL_v\rho\Delta\rho}$
	$Da \rightarrow \infty$	$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{1}{10 Da}}}$	$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{1}{10 Da}}}$
Число Нуссельта	$Da \rightarrow 0$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{12 Da_0} = \sqrt[4]{12 Da}$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{144 Da_0} = \sqrt[3]{12^{2/3} Da}$
	$Da \rightarrow \infty$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{10 Da}}$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{1}{10 Da}}$

Висновки

Дана робота присвячена дослідженню тепловіддачі при кипінні рідини на вертикальній стінці, зануреній у пористе середовище, за умови зміни параметрів пористості та умов нагрівання стінки. Для малих чисел Рейнольдса $Re_k < 1$ отримано аналітичне рішення задачі за допомогою моделі пористого середовища в наближенні Дарсі–Брінкмана.

Показано, що інтенсивність теплообміну під час плівкового кипіння в пористому середовищі слабша, в порівнянні з теплообміном при відсутності пористості і зменшується зі зменшенням проникності пористого середовища. Визначено, що вплив різних теплових граничних умов на стінці на тепловіддачу є незначним.

Робота виконана за фінансової підтримки програми наукових досліджень НАН України 6541230 «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок», 2022 – 2023 р. Проект 7/1/2 «Розроблення наукових засад процесів тепломасопереносу і горіння для вдосконалення технологій отримання та використання відновлюваних видів палива з метою декарбонізації енергетики України»

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография/ под ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий. 2007. 240 с.
2. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1. P.1–31
3. Hari R., Jolly T., Muraleedharan C. Analysis of Two-Phase Flow in the Capillary Wick Structure of Flat Heat Pipe with Different Orientation. *International Journal of Thermal Technologies*. 2015. Vol.5. No.1. P.63–69
4. Alomar O.R., Trimis D., Mendes M., Ray S. Numerical simulation of complete liquid-vapor phase change process inside porous media: A comparison between local thermal equilibrium and non-equilibrium models. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 112. P. 222 – 241.
5. Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S. Trimis D. Numerical investigation of complete evaporation process inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 129. P.56 – 72.
6. Yuki K, Abei J, Hashizume H, Toda S. Numerical investigation of thermo fluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media. *J Heat Trans. T ASME*. 2008. Vol.130(1). P.012602 (1–12)
7. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmand S., Tyrinov A.I. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. V. 223. P. 156–164
8. 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. V.91. P.77–88
9. 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 & Fluid Flow*. 2010. V. 20(1). P. 111–129
10. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015. V.29(5). P.351–371
11. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. An analytical and numerical study on the start-up flow of slightly rarefied gases in a parallel-plate channel and a pipe. *Physics of Fluids*. 2015. V.27(4). 042001
12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media*. 2008. V.11(3). P. 241–246
13. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p.
14. Авраменко А.О., Ковецька М.М., Дмитренко Н.П., Ковецька Ю.Ю. Вплив пористого середовища на теплообмін при плівковому кипінні рідини. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. т.43, №3. С. 7–15.
15. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 1164–1173
16. Ellion, M.E. A Study of the mechanism of Boiling heat transfer. *Jet Prop. Lab. Memo, CIT*. 1954. 20, P. 1– 88.
17. Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кондратьєва О.О., Сорокіна Т.В. Теплообмін при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагріває мій стінці в пористому середовищі. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. т.43, №1. С. 20–29.

FILM BOILING OF A LIQUID ON A VERTICAL PLATE IN A POROUS MEDIUM

Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I., Kondratieva E.A., Oliinyk L.V.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.1>

The paper presents results of the modeling of heat transfer at film boiling of a liquid in a porous medium on a vertical heated wall. Such processes are observed at cooling of high-temperature surfaces of heat pipes, microstructural radiators etc. Heating conditions at the wall were the constant wall temperature or heat flux.

An analytical solution was obtained for the problem of fluid flow and heat transfer using the Darcy-Brinkman porous medium model. It was shown that heat transfer at film boiling in a porous medium was less intensive than in the absence of a porous medium and further decreased with the decreasing permeability of the porous medium. A sharp decrease in heat transfer was observed for the Darcy numbers lower than five. Effects of different thermal boundary conditions on the heated wall on the heat transfer are insignificant.

References 17, figures 2, tables 1.

Key words: heat transfer, film boiling of liquid, porous medium.

1. Popov I.A. *Gidrodinamika i teploobmen v poristyyh teploobmennyyh elementah i apparatah. Intensifikatsiya teploobmena* [Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and apparatuses. Heat transfer intensification], Monografiya [Monograph], Kazan: Center for Innovative Technologies. 2007. 240 p. (in Rus)

2. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1. P.1–31

3. Hari R., Jolly T., Muraleedharan C. Analysis of Two-Phase Flow in the Capillary Wick Structure of Flat Heat Pipe with Different Orientation. *International Journal of Thermal Technologies*. 2015. Vol.5. No.1. P.63–69

4. Alomar O.R., Trimis D., Mendes M., Ray S. Numerical simulation of complete liquid-vapor phase change process inside porous media: A comparison between local thermal equilibrium and non-equilibrium models. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 112. P. 222 – 241.

5. Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S. Trimis D. Numerical investigation of complete evaporation process

inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 129. P.56 – 72.

6. Yuki K, Abei J, Hashizume H, Toda S. Numerical investigation of thermo fluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media. *J Heat Trans. T ASME*. 2008. Vol.130(1). P.012602 (1–12)

7. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmand S., Tyrinov A.I. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. V. 223. P. 156–164.

8. 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. V.91. P.77–88.

9. 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 & Fluid Flow*. 2010. V. 20(1). P.111–129.

10. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015. V.29(5). P.351–371

11. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. An analytical and numerical study on the start-up flow of slightly rarefied gases in a parallel-plate channel and a pipe. *Physics of Fluids*. 2015. V.27(4). 042001

12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media*. 2008. V.11(3). P.241–246.

13. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p.

14. Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Dmitrenko N.P., Kovetska Yu.Yu. [Influence of porous medium on heat exchange during film boiling of liquid], *Теплофізика та теплоенергетика* [Thermophysics and thermal power engineering]. 2021. V.43, №3. P. 7–15 (in Ukr)

15. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 1164–1173

16. Ellison, M.E. A Study of the mechanism of Boiling heat transfer. *Jet Prop. Lab. Memo, CIT*. 1954. 20, P. 1– 88.

17. Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A., Sorokina T.V. [Heat transfer at film boiling of liquid on vertical heated wall in the porous environment], *Теплофізика та теплоенергетика* [Thermophysics and thermal power engineering]. 2021. V.43, №1. P. 20–29 (in Ukr)

Отримано 02.02.2022

Received 02.02.2022

УДК: 536.24:541.11

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОДНО- ТА ДВОРЯДНОГО ПУЧКА ЦИЛІНДРІВ ЗІ СПІРАЛЬНОЮ КАНАВКОЮ НА ЗОВНІШНІЙ ПОВЕРХНІ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ

Мулярчук М.А., Халатов А.А., академік НАН України, Коваленко Г.В., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.2>

Наведено результати експериментального дослідження теплогідравлічної ефективності одно- та дворядного пучка круглих циліндрів зі спіральною канавкою на зовнішній поверхні при поперечному обтіканні повітрям. Аналіз виконаний в діапазоні зміни числа Рейнольдса від 6800 до 12000. Для однорядного пучка циліндрів Фактор Аналогії Рейнольдса більше одиниці для всіх чисел Рейнольдса, а для дворядного - тільки при $Re_D < 10000$. Висока теплогідравлічна ефективність обумовлена формуванням у кормовій зоні циліндрів вихрової структури зі структурами, що «переплітаються»

The results of an experimental study of the thermohydraulic efficiency of a single- and double-row beam of round cylinders with a spiral groove on the outer surface during transverse airflow are presented. The analysis was performed in the range of Reynolds number change from 6800 to 12000. For a single-row cylinder bundle the Reynolds Analogy Factor is more than one for all Reynolds numbers, and for a double-row - only at $Re_D < 10000$. High thermohydraulic efficiency is due to the formation in the aft zone of vortex structure cylinders with intertwined structures

Бібл. 6, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: атеплогідравлічна ефективність; спіральна канавка; поперечне обтікання; фактор аналогії Рейнольдса; вихрові структури, що «переплітаються».

ФАР – фактор аналогії Рейнольдса;

Eu – число Ейлера;

Re – число Рейнольдса;

 t – температура;

RNG k-ε – модель турбулентності.

Вступ

Циліндри з круговим перерізом при поперечному обтіканні потоком повітря широко зустрічаються у різних технічних установках [1], [2]. При використанні циліндрів з круговим перерізом у теплообмінних апаратах у кормовій області формується парний вихор, який є джерелом високого теплообміну та значних втрат тиску. При цьому зростання гідравлічних втрат перевищує відповідне збільшення теплообміну [3], [4]. Тому велике значення має розробка нових поверхонь теплообміну з високою теплогідравлічною ефективністю, що характеризується Фактором Аналогії Рейнольдса (ФАР) та є відношенням інтенсифікації теплообміну (Nu/Nu_0) до витрат енергії на прокачування потоку (Eu/Eu_0).

В ІТТФ НАН України виконано великий цикл експериментальних та теоретичних досліджень у галузі нових поверхонь теплообміну з високими теплогідравлічними характеристиками. Було виявлено, що при використанні поверхневих заглиблень на поверхні круглого циліндра при поперечному обтіканні відбувається зміщення точки відриву вниз по потоку і формування специфічної вихрової структури, яка сприяє зниженню втрат тиску і

росту теплообміну. При цьому Фактор Аналогії Рейнольдса стає більше одиниці, що свідчить про випереджальне зростання теплообміну. Дослідження теплообміну та гідравлічного опору при обтіканні циліндрів з круговим перерізом зі спіральною канавкою на поверхні теплообміну, виконані в роботі [5], показали, що в даному випадку формування вихрової структури також сприяє випереджальному зростанню теплообміну. Однак причина високої теплогідравлічної ефективності такої поверхні досі не набула фізичного пояснення.

У цій роботі виконано аналіз теплогідравлічної ефективності одно- та дворядного пучка циліндрів з круговим перерізом зі спіральною канавкою на зовнішній поверхні при поперечному обтіканні повітрям. Для аналізу використані експериментальні дані з теплообміну та гідравлічного опору, представлені в роботі [5]. Фізична структура потоку визначалася на основі комп'ютерного моделювання за чисельного розв'язання системи рівнянь руху та енергії.

1. Об'єкти дослідження

В якості об'єктів дослідження в роботі [5] використовувалися одно- та дворядний пучки циліндрів (останні

розташовувались в шаховому порядку), фото циліндрів, що досліджувались, представлено на рис. 1. Діаметр кожного з циліндрів дорівнював 22 мм, їхня довжина – 220 мм, в свою чергу довжина робочої ділянки, що обдувалась поперечно потоком повітря, складала $L=105$ мм.

Однорядний або дворядний пучки складався з круглих циліндрів з одним типом канавки. Геометричні параметри циліндрів представлені в таблиці. Об'єкти дослідження виконані з нержавіючої сталі 1Х18Н9Т, виготовлялись на токарному верстаті в ІТТФ НАНУ. Товщина стінки циліндра 2 мм, на поверхні циліндра були сформовані спіральні канавки шириною 3 мм, глибиною 1,8 мм. Для визначення середньої тепловіддачі використовувався метод танення льоду, для визначення втрат тиску вимірювався розподіл тиску перед циліндрами та за ними. Детальний опис методики вимірювань теплообміну та гідравлічного опору наводиться у роботі [5].

2. Теплогідравлічна ефективність

У цій роботі Фактор Аналогії Рейнольдса ФАР визначався відношенням $(Nu/Nu_0)/(Eu/Eu_0)$, де Nu/Nu_0 – інтенсифікація теплообміну, а Eu/Eu_0 – збільшення гідравлічних втрат. Як базові значення використовувалися числа Нуссельта і Ейлера при поперечному обтіканні гладкого кругового циліндра (Nu_0 , Eu_0).

На рис. 2 представлені результати визначення теплогідравлічної ефективності однорядного пучка циліндрів зі спіральною канавкою для чисел Рейнольдса 6800, 8000, 12000. Відповідно до рекомендації [6] абсолютна величина ФАР визначалася залежно від відношення Eu/Eu_0 . Отже для всіх циліндрів величина ФАР більша за одиницю і значно перевищує величину ФАР для однорядного пучка гладких циліндрів. Для зразка SPI_40 він у середньому дорівнює 1.5, для зразка SPI_10 – 1.63 та для зразка SPI_20 – 1.25.

Таблиця

№	Позначення	Кількість канавок	Крок спіралі t , мм	Відносний крок спіралі t/D
1	Sm	0		
2	SPI_10	1	10,0	0,45
3	SPI_20	1	20,0	0,91
4	SPI_40	1	40,0	1,82
5	SPI_20_2	2	20,0	0,91



Рис. 1. Фото циліндрів, з однією спіральною канавкою на зовнішній поверхні:
1 – циліндр з гладкою поверхнею; 2, 3, 4 – циліндри зі спіральними канавками, крок спіралі:
2 – 10 мм ; 3 – 20 мм ; 4 – 40 мм

Занижений результат для канавки з кроком 20 мм в порівнянні з іншими канавками пов'язаний з невеликою інтенсифікацією теплообміну. Таким чином, для всіх досліджених зразків інтенсифікація теплообміну випереджає зростання втрат тиску, що характеризує високу теплогідрравлічну ефективність однорядного пучка з гвинтовими канавками на зовнішній поверхні.

Для дворядного пучка циліндрів результати визначення теплогідрравлічної ефективності представлені на рис. 3 ($Re_D = 6800, 8000, 12000$). Отже, при обтіканні дворядного пучка циліндрів в залежності від числа Рейнольдса теплогідрравлічна ефективність пучка може бути як меншою, так і більшою за одиницю. Для всіх чисел Рейнольдса найкращі показники теплогідрравлічної

ефективності демонструє дворядний пучок циліндрів SPI2_20_2 з двома канавками на зовнішній поверхні та кроком 20 мм. Таким чином, і в даному випадку за певних умов можливі умови випереджаючого зростання теплообміну порівняно зі зростанням гідрравлічних втрат.

3. Комп'ютерне моделювання

Для визначення фізичної причини високих значень теплогідрравлічної ефективності виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки та теплообміну повітряного потоку при обтіканні однорядного пучка циліндрів з кроком 20 мм SPI_20 (табл). При комп'ютерному моделюванні вихрових потоків важливе значення має

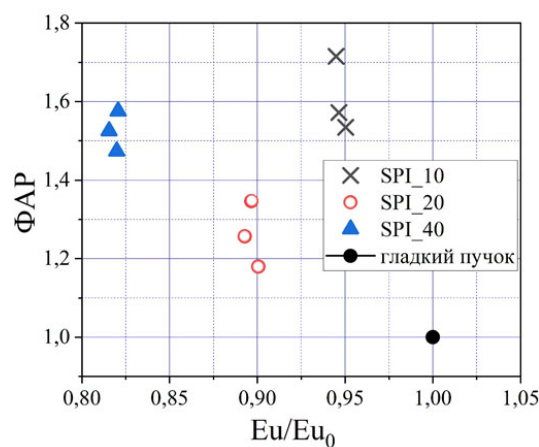


Рис. 2. Теплогідрравлічна ефективність однорядного пучка циліндрів зі спіральними канавками на зовнішній поверхні з різним кроком (пояснення позначень представлені в таблиці)

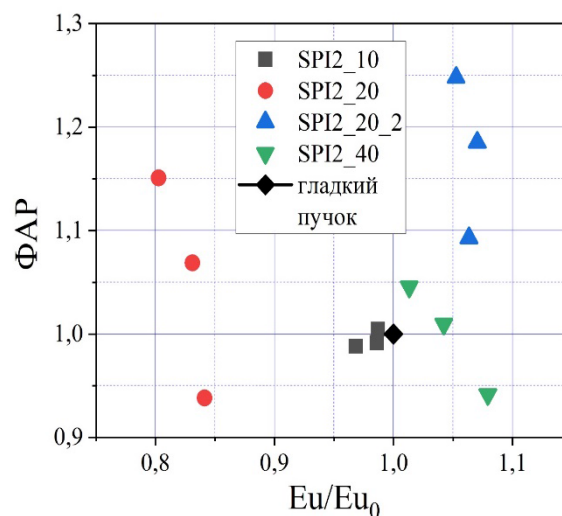


Рис. 3. Теплогідрравлічна ефективність дворядного пучка циліндрів зі спіральними канавками на зовнішній поверхні з різним кроком (пояснення позначень представлені в таблиці)

точність розрахунку внаслідок формування вихрового потоку між циліндрами та в їх кормовій частині. Тому в якості об'єкту дослідження вибрано однорядний пучок SPI_20 (табл.) з невисокою вихровою структурою, що визначається незначної інтенсифікацією теплообміну і значним зменшенням опору. Як впливає (рис. 2), теплогідравлічна ефективність пучка SPI_20 складає 1.18...1.35, тобто є найменшою в порівнянні з іншими однорядними пучками, що досліджувались в роботі.

Дискретизація розрахункової області проводилась у вбудованому редакторі сіток ANSYS Mesh. На поверхні стінки були створені шари з призматичних елементів, які дозволяють якісно описати процеси, що відбуваються в приміжовому шарі та в канавці. Основними параметрами дискретизації розрахункової області були: число шарів з призматичних елементів, яке дорівнювало 10, і фактор приросту цих шарів, рівний 1.05. Максимальний розмір чарунки дорівнював 5 мм. Граничні умови приймалися симетричними.

В якості граничних умов задавались постійна і рівномірна по висоті швидкість потоку перед пучком циліндрів, атмосферний тиск на виході з пучка (10^5 Па) і температура повітря на вході (22°C). Теплофізичні властивості повітря задавались за допомогою емпіричних рівнянь. Для поверхні циліндрів ставились граничні умови першого роду – $t = 0^\circ\text{C}$, на інших сторонах каналу ставились симетричні граничні умови. Точність розрахунків задавалась до п'ятого знаку для основних параметрів (при відсутності змін в п'ятому знаку між послідовними ітераціями розрахунок зупи-

нявся). Для дослідження використовувався метод числового розв'язання рівнянь руху та нерозривності, та енергії з використанням пакету прикладних програм ANSYS CFX.

При тестуванні проаналізовані три моделі турбулентності – RNG $k-\varepsilon$, LRR і SSG, які показують надійні результати при моделюванні вихрових потоків. Результати моделювання порівнювались з результатами експериментального дослідження середнього теплообміну при поперечному обтіканні однорядного пучка циліндрів зі спіральною канавкою SPI_20 [5]. Аналіз чутливості показав, що задовільне узгодження з експериментальними даними при обтіканні циліндра з канавкою досягається при використанні сітки з кількістю елементів 11.5 млн. Результати верифікації показали, що найменше розходження з експериментом спостерігається у моделі RNG $k-\varepsilon$ (3.4% при максимальному числі Рейнольдса $Re_D = 15800$). Дві інші моделі демонструють занижені результати - для всього діапазону чисел Рейнольдса середня різниця для обох моделей турбулентності в порівнянні з експериментальними даними становила приблизно 15%.

4. Результати комп'ютерного моделювання

Як відомо, в області $Re_D = 10000 \dots 20000$ за гладкими циліндрами виникають два симетричні вихори, які утворюють вихрову доріжку. При невеликих числах Рейнольдса (як у цій роботі) на передній області циліндра формується ламінарний приміжовий шар, який відривається від поверхні циліндра при куті приблизно 82° . Довжина відривної зони становить кілька діаметрів.

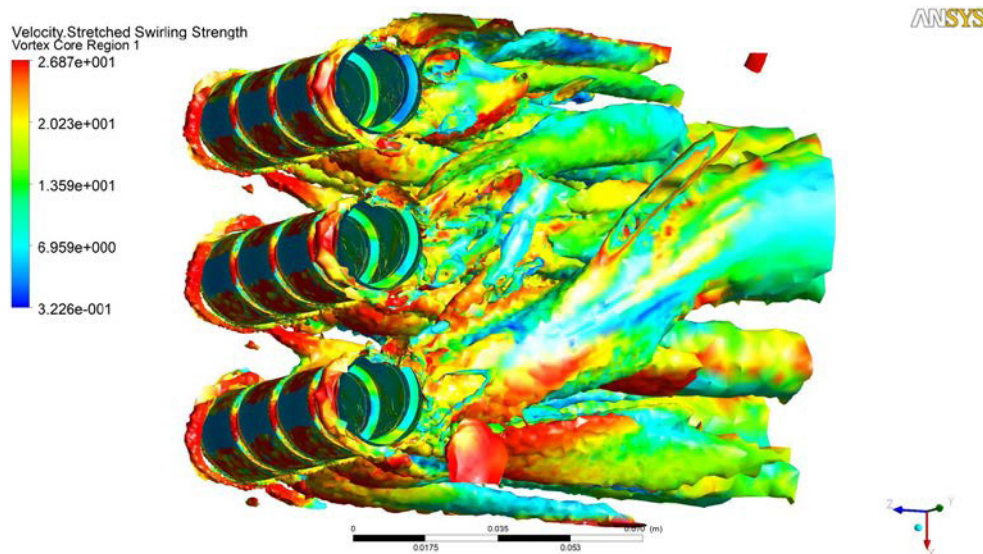


Рис. 4. Вихрова структура при обтіканні одного ряду циліндрів з гвинтовою канавкою на зовнішній поверхні ($Re_D = 10\,000$)

Таким чином, на поверхні гладкого циліндра при числах Рейнольдса, характерних для цього дослідження, має місце ламінарна і відривна структури потоку.

Розрахунки показують, що обтікання одного ряду циліндрів зі спіральною канавкою на поверхні має складнішу структуру (рис. 4). Це пов'язано з тим, що різні області поверхні циліндрів обтікаються по-різному. Одна частина потоку обтікає лише гладку частину циліндра між канавками, залишаючись ламінарною та відривною за схемою обтікання гладкого циліндра; у той час як інша частина «зустрічається» з гвинтовою канавкою на різних відстанях від лобової точки та переходить у турбулентну структуру за нею. Деяка частина потоку формує закручений струмінь у канавці, який при

певних кутах обтікання викидається з нього за рахунок відцентрової сили. Це викиди чітко помітні на рис. 4.

Комп'ютерна візуалізація обтікання одного ряду циліндрів зі спіральною канавкою в центральному перерізі та на відстані 13 мм вниз від центру представлена на рис. 5 і 6. Аналіз показує відмінність у картині обтікання, що з різною відстанню «зустрічі» потоку з гвинтовою канавкою. В обох випадках кут відриву істотно зростає в порівнянні з гладким циліндром і більш характерний для обтікання гладкого циліндра при великих числах Рейнольдса. Таким чином, після взаємодії з гвинтовою канавкою потік стає турбулентним. У сліді за циліндрами лінії струму спрямовані всередину потоку, що особливо добре видно на рис. 6.

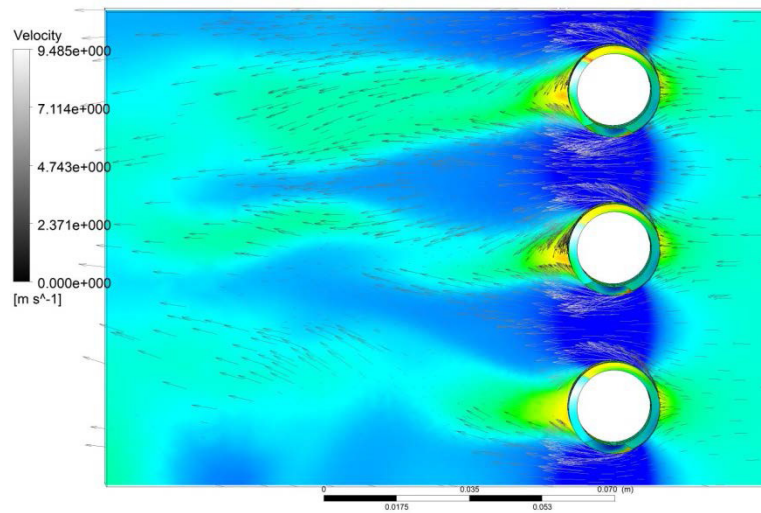


Рис. 5. Обтікання одного ряду циліндрів. Площина візуалізації через середину висоти циліндрів ($Re_D=10\,000$)

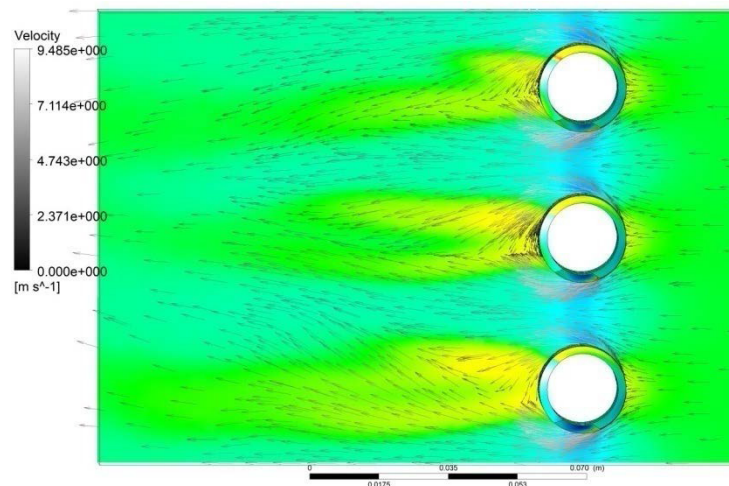


Рис. 6. Обтікання одного ряду циліндрів. Площина візуалізації на відстані 13 мм вниз від центру висоти циліндрів ($Re_D=10\,000$)

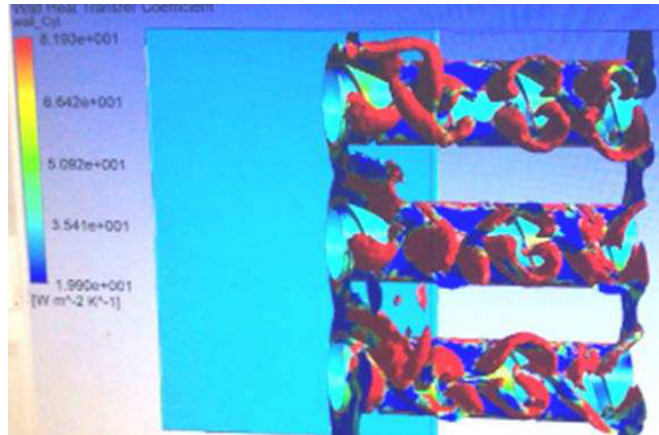


Рис. 7. Вихрова структура потоку за одним рядом циліндрів зі спіральною канавкою ($Re_D=10\,000$)

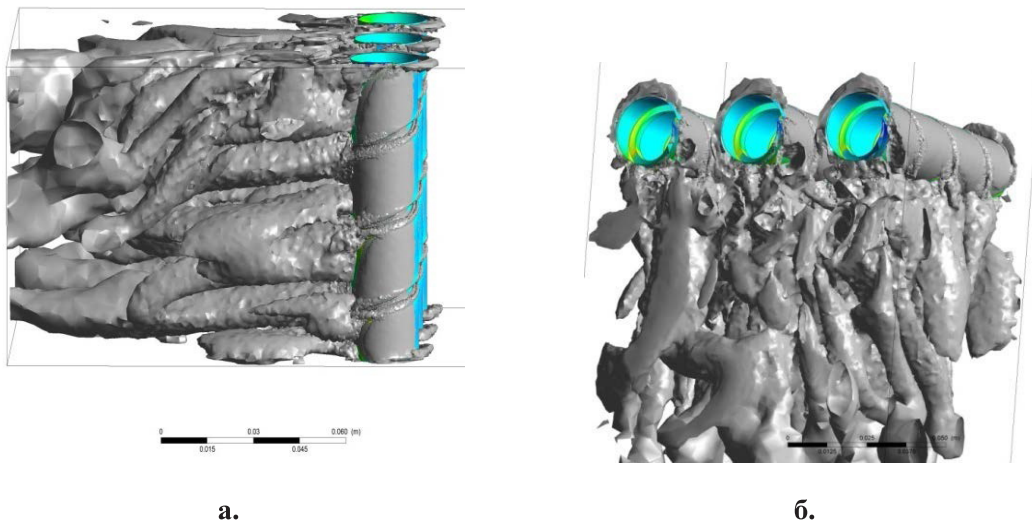


Рис. 8. Структура вихроутворення за одним рядом циліндрів ($Re = 10000$)

Результати моделювання вихрової структури в області за циліндрами, представлені на рис.7, показують, що за циліндрами зі спіральною канавкою вихрові структури «переплітаються» одна з одною, формуючи вихрову структуру принципово нового типу.

Детальний аналіз вихрової зони за циліндрами (рис. 8) показує, що в ній утворюються 2 види вихрових структур. Канавка, яка проходить в зоні між циліндрами, провокує утворення довгих «мотузкоподібних» вихорів, по яким рухаються «муфтоподібні» вихори. Так як вихори різних розмірів і форми і в них різна швидкість, то слід очікувати, що вони продукуватимуть як мінімум дві частоти флуктуацій потоку. В області між циліндрами в зоні, де проходить канавка, довгі вихрові структури

підвищують теплообмін на гладких ділянках сусідніх циліндрів. Структура вихроутворення за одним рядом циліндрів зі спіральними канавками практично відповідає структурі вихроутворення за одиночним циліндром зі спіральною канавкою на поверхні [5].

Таким чином, вихрова структура за одним рядом циліндрів зі спіральною канавкою принципово відрізняється від структури обтікання гладкого циліндра, що сприяє зниженню гідравлічних втрат у порівнянні з обтіканням гладких циліндрів. Зовнішній потік не завихрюється як за гладким пучком, а рухається по поверхні «муфтоподібних» вихорів з низькими втратами тиску. Тому при обтіканні циліндрів зі спіральною канавкою втрати тиску для конфігурації SPI_20 приблизно на 10% менше, ніж при обтіканні гладкого пучка.

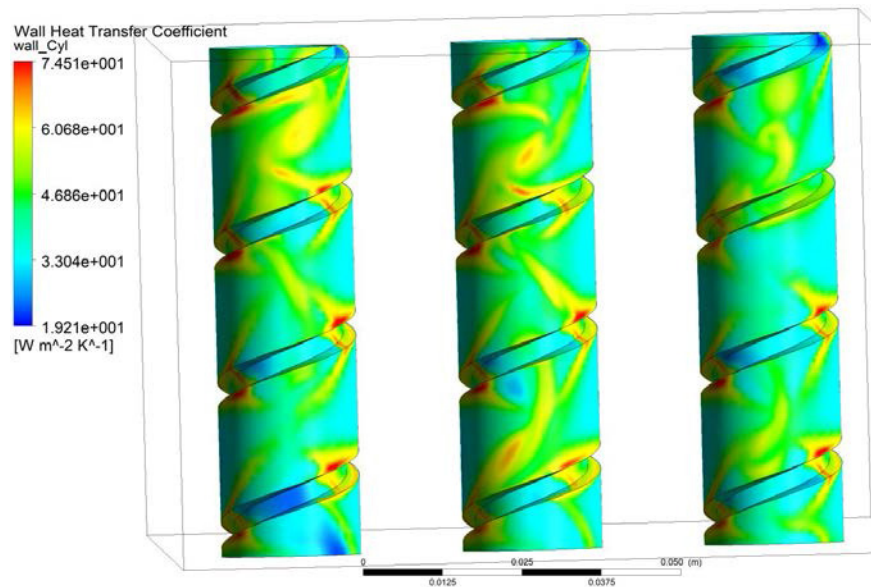


Рис. 9. Тепловіддача у кормовій області циліндрів ($Re_D=10000$)

Результати визначення тепловіддачі в кормовій області циліндрів із спіральною канавкою представлені на рис. 9. У вихровій ділянці на поверхні циліндрів видно області високого теплообміну жовтого кольору. Ці області розташовуються як у зрізі канавок, і у кормовій області циліндрів. У кормовій ділянці поверхні високого теплообміну пересікаються між собою, що зумовлено «переплетенням» вихрових структур (рис. 7).

Взаємодія закручених струменів, що виходять із канавок сусідніх циліндрів, також сприяють інтенсифікації теплообміну на поверхні циліндрів. Експериментальне дослідження [5] показало, що для конфігурації, що розглядається (SPI_20) збільшення середнього теплообміну склало більше 20% порівняно з пучком гладких циліндрів. В цілому, за рахунок зниження гідравлічних втрат при обтіканні пучка циліндрів приблизно на 10% теплогідравлічна ефективність становила понад 30%. Слід очікувати, що чим більший крок канавки, тим більша відстань між сусідніми струменями і тим більшу поверхню буде охоплювати вихор, утворений на задній поверхні циліндра.

Отримані результати показують, що при використанні теплообмінних поверхонь зі спіральними канавками треба віддавати перевагу пучку циліндрів з асиметричним розташуванням канавок. Якщо положення циліндрів з нанесеними на їх поверхні канавками ідентичні, вихори від сусідніх циліндрів можуть перешкоджати один одному при невеликих кроках їх розміщення в пучку. Це може бути причиною переваги тепловіддачі у циліндричних поверхнях з однозахідними канавками над подібними поверхнями з двозахідними.

Висновки

1. Основною причиною зниження опору в однорядному пучку циліндрів зі спіральною канавкою є формування вихрових структур, що «переплітаються» за циліндрами. В цьому випадку зовнішній потік не формує парний вихор у кормовій ділянці як у гладкому пучку, а рухається по поверхні «муфтоподібних» вихорів, що забезпечує низькі втрати тиску.

2. Високий теплообмін у кормовій області циліндрів та взаємодія вихрових структур на бокових поверхнях сусідніх циліндрів сприяють високому рівню середнього теплообміну на поверхні циліндрів зі спіральними канавками порівняно з однорядним пучком гладких циліндрів.

3. Особливості вихрової структури та теплообміну біля циліндрів зі спіральними канавками на поверхні визначають високий фактор теплогідравлічної ефективності та випереджальний ріст теплообміну порівняно із збільшенням гідравлічних втрат.

4. Отримані результати дозволяють висловити припущення, що у дворядному пучку циліндрів при низьких числах Рейнольдса ($Re_D < 10\,000$) діє такий самий механізм інтенсифікації теплообміну та зниження втрат тиску, що сприяє фактору теплогідравлічної ефективності більше одиниці.

5. Розглянутий тип теплообмінної поверхні має великий практичний інтерес при розробці теплообмінних апаратів з високими теплогідравлічними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости // Вильнюс. «МОКСЛАС» 1979. - 235 С.
2. Мигай В.К., Фирсова Э. В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Ленинград. Издательство «НАУКА» 1986.195 С.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва. Издательство «НАУКА» 1969. – 742 С.
4. Манеев А. П., Терехов В. И. Аэродинамика и теплообмін димовых труб. «Научное обозрение» <http://russian-science.info>.
5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Muliarchuk M.A. Research of hydrodynamics and heat transfer during the transverse air flow of a row of cylinders with screw grooves // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2020. – № 3/8. (105), С. 39 – 45.
6. Халатов А.А, Доник Т.В. Новый критерий теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена. Доповіді Національної академії наук України, 2014.

THERMAL HYDRAULIC EFFICIENCY OF ONE AND TWO-ROW BUNCH OF CYLINDERS WITH A SPIRAL GROOVE ON THE OUTER SURFACE WITH TRANSVERSE FLOW

Mulyarchuk M.A., Khalatov A.A., Kovalenko G.V.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.2>

The results of experimental study of thermohydraulic performance of a single- and double-row of bundle of round cylinders with screw groove on the external surface at the air cross-flow are presented. The analysis was performed at the Reynolds number range from 6800 to 12000. For a single-row bundle the Reynolds Analogy Factor is more than unity for all Reynolds numbers studied, while for the double-row of cylinders it is over the unity at $Re_D < 10000$. The high thermohydraulic performance is due to the formation of the «interwined vortex structures» in the back cylinder zone. The obtained results show that when using heat exchange surfaces with spiral grooves it is necessary to prefer a beam of cylinders with an asymmetric arrangement of grooves. If the positions of the cylinders with grooves on their surface are identical, vortices from adjacent cylinders may interfere with each other in small steps of their placement in the beam. This may be the reason for the advantage of heat transfer in cylindrical surfaces with one-west grooves over similar surfaces with two-west.

References 6, tables 1, figures 9.

1. Zhukauskas A., Zhyugzhda I. Heat transfer of a cylinder in a transverse fluid flow.// Vilnius. "MOKSLAS" 1979. - 235 S.

2. Migay V.K., Firsova E.V. Heat exchange and hydraulic resistance of tube bundles. Leningrad. Publishinghouse "NAUKA" 1986.195 S.

3. Schlichting G. Theory of the boundary layer. Moscow. Publishinghouse "NAUKA" 1969. - 742 p.

4. Maneev A. P., Terekhov V. I. Aerodynamics and heat exchange of smoke pipes. "ScientificReview" <http://russian-science.info>.

5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Muliarchuk M.A. Research of hydrodynamics and heat transfer during the transverse air flow of a row of cylinders with screw grooves // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2020. – № 3/8. (105), С. 39 – 45.

6. Khalatov A.A., Donyk T.V. A new criterion of thermohydraulic performance of heat transfer intensifiers. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014.

Отримано 20.04.2022

Received 20.04.2022

УДК: 66.021.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА
ВЛАСТИВОСТІ СКЛАДНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМАвдєєва Л.Ю.¹, докт. техн. наук, Павлик В.Ю.²¹Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна, avdeeva22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», магістр 2 року, пр. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.3>

Наведено результати експериментальних досліджень впливу особливостей геометрії конструкції сопла Вентурі в статичних кавітаційних змішувачах проточного типу на характеристики потоку при утворенні емульсійних систем. Серед характеристик гідродинаміки потоку визначені витрати і швидкість потоку, число Рейнольдса, а також число кавітації.

The presented results of experimental studies describe the influence of the geometry features of the Venturi nozzle design on the flow characteristics during the formation of emulsion systems in static cavitation mixers. Flow rate, flow velocity, Reynolds number and cavitation number are defined among the characteristics of hydrodynamics of the flow.

Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: кавітація, гідродинаміка, сопло Вентурі, кавітаційний змішувач, емульсія.

V – середня швидкість потоку;

D – діаметр трубки;

 μ – в'язкість; ρ – густина рідини;

p – тиск перед соплом;

v – швидкість течії в соплі;

p кав – мінімальний тиск в потоці.

Постановка проблеми

Модифікація найбільш поширених, але морально застарілих енергоємних технологічних процесів і обладнання для підвищення їх ефективності за рахунок усунення непродуктивних втрат енергії є однією із головних проблем сучасного виробництва. При цьому мають враховуватись універсальність обладнання, його продуктивність, зручність і безпечність обслуговування, а також можливість одержання продукції високої якості.

Прикладом енерговитратних технологічних процесів можуть служити процеси, пов'язані з обробкою рідких багатокомпонентних гетерогенних систем. До таких процесів відносяться диспергування, гомогенізація і емульгування, які широко використовуються практично у всіх галузях народного господарства. Зокрема мікро- і наноемульсії широко застосовують в медицині, фармацевтичній, хімічній і харчовій галузях, а також сільському господарстві. Велика кількість харчових продуктів випускається у формі емульсій: молоко і молочні продукти, соуси, десерти, морозиво та ін. Все більше уваги приділяється використанню фармацевтичних емульсій для лікувального (ентерального і пе-

рорального) і дитячого харчування, а також їх використання в якості кровозамінників. Це обумовлено їх особливостями: властивістю поєднувати жиркову і водну фази, можливістю додавання активних водо- і жиророзчинних компонентів, підвищеною біодоступністю і високою засвоюваністю [1, 2, 3].

На сьогодні підвищений інтерес спостерігається до використання емульсій при створенні лікувальних і косметичних засобів. Такі засоби, завдяки широкому використанню екстрактів і частин цілющих рослин, ефірних олій, вітамінних і мінеральних комплексів, інших речовин з відмінними фізико-хімічними властивостями мають високу ефективність і біологічну активність, легку всмоктуваність та користуються великим попитом у населення.

Серед різних косметичних продуктів представлених на споживчому ринку найбільш поширеними засобами є емульсійні косметичні креми. Це обумовлено їх високою косметичною ефективністю і рентабельністю виробництва даної групи виробів. Емульсійні креми прямого типу «олія у воді» — це рідкі або «м'які» непрозорі креми, які містять у своєму складі від 40 до

90 % води. Присутність у їх складі води сприяє швидкому змочуванню і гідратації шкірної поверхні, а також сприяє збільшенню сорбційних властивостей крему. Крім підготовленої води до складу легких емульсій входять олії, поверхнево-активні речовини, екстракти лікарських рослин, біологічно активні речовини, білкові гідролізати, вітаміни, віддушки, консерванти та інші компоненти [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

При виборі ефективного обладнання мають бути врахованими його універсальність, продуктивність, енергоефективність, зручність і безпечність обслуговування, а також можливість одержання готової продукції із заданими характеристиками.

Досить часто на підприємствах для отримання емульсій, що легко утворюються використовують метод інтенсивного механічного перемішування за допомогою швидкохідних мішалок. Однак їх використання не дозволяє отримати необхідної дисперсності системи, що досягається за рахунок використання гомогенізації [3]. Використання гомогенізації стало стандартним виробничим процесом для отримання стабільних емульсій з розміром жирових бульбашок до 2 мкм. При цьому поверхня утвореної мембрани змінює свій хімічний склад, а площа поверхні розділення між фазами збільшується в чотири-шість разів. Для отримання однорідних і стабільних емульсій, з високим ступенем дисперсності частинок найчастіше використовують змішувачі і гомогенізатори різних типів: гомогенізатори клапанні високого тиску, роторно-пульсаційні апарати, ультразвукові, колоїдні млини та ін. [1, 3].

В гомогенізаторах клапанного типу емульгування відбувається в системі клапанів під високим тиском (до 25 МПа). Гомогенізатори можуть бути оснащені однією гомогенізуючою голівкою або двома. При проходженні потоку вузьким каналом його швидкість зростає поки статичний тиск не знизиться до такого рівня, при якому рідина почне закипати. Максимальна швидкість залежить від тиску гомогенізації на вході. Після проходження щілини, швидкість знижується, а тиск починає зростати. Кипіння рідини припиняється і парові бульбашки вибухають [4, 5].

Ступінь дисперсності (може становити 1 мкм і менше) і якість емульсій залежить від гідравлічних умов в зоні клапанної щілини і регулюється ступенем відкриття клапану, що робить ці гомогенізатори досить універсальними. Однак, вони відносяться до енергоємних і металомістких: в залежності від тиску і продуктивності витрати електроенергії становлять

від 36 до 140 кВт/год, клапани в процесі експлуатації швидко зношуються і вимагають частой заміни. Загальна маса гомогенізатора може перебувати в межах від 600 до 4000 кг [1, 4, 5].

Для виготовлення емульсій, що містять нерозчинні тверді речовини використовують колоїдні млини. Подрібнення частинок відбувається за рахунок удару або тертя. Найбільший інтерес представляють роторно-більні і віброкавітаційні колоїдні млини. Роторно-більний млин представляє собою апарат ударного типу з одним диском, що обертається і закріпленими концентричними рядами пальцями (білами). Подрібнення частинок відбувається в результаті багатократних ударів при обертанні диску. Внаслідок високої швидкості руху біл і частинок суміші і їх зіткнення з контрударниками досягається значний кавітаційний ефект, коли кавітаційні пухирці при зхлопуванні утворюють інтенсивні кумулятивні мікрострумені.

Значно більшу продуктивність мають віброкавітаційні колоїдні млини. Він складається із статора і ротора, що мають прокольні канавки і встановлені в середині корпусу млина. При обертанні ротору суспензія рухається о канавках між статором і ротором. В результаті руху суспензії утворюються високочастотні коливання, наближені до ультразвукових, що обумовлює високу ступінь подрібнення частинок. Колоїдне подрібнення є складним та маловивченим процесом. До теперішнього часу процес не має надійної теоретичної основи, тому використання колоїдних млинів для емульгування є обмеженим [1].

Ультразвукові гомогенізатори - це електромеханічні і гідродинамічні пристрої, що створюють звукові і ультразвукові коливання в гомогенізованій суміші. Найбільш відомий з них - гідродинамічний свисток. Принцип дії його заснований на проходженні потоку рідини через зону максимального впливу ультразвукового поля, створюваного самим же потоком. Потік дробиться на струмені, які, багаторазово взаємно перетинаючись з великою швидкістю, створюють інтенсивні вихори і акустичні коливання високих частот. При виході з сопла закрученого потоку виникають найбільш інтенсивні вихори, що створюють коливання, ще більш посилюються встановленою на виході трубкою - резонатором, що утворює в потоці рідини кавітаційні порожнини [6]. Ультразвуковий метод емульгування вельми ефективний: повнота емульгування становить 95%. Метод забезпечує високу ступінь дисперсності (0,1-0,5 мкм) і стійкість емульсії при тривалому зберіганні. Металоемність і енергоемність ультразвуку

кового гомогенізатора в порівнянні з гомогенізатором клапанного типу такої ж продуктивності, нижче в 5-7 разів [5, 6].

За сучасними уявленнями, підвищення ефективності роботи обладнання можливе за рахунок більш повного використання внутрішніх і зовнішніх джерел енергії. До такого типу обладнання відносяться роторно-пульсаційні апарати (РПА). Вони знайшли широке застосування для утворення вискодиспергованих гомогенізованих емульсій і суспензій при температурі обробки до 95°C. Принцип їх роботи заснований на використанні нестационарності потоків речовини, енергії і імпульсу. За рахунок комплексного імпульсного, ударного, кавітаційного і інших видів гідромеханічних впливів на складні багатокомпонентні гетерогенні дисперсні системи відбувається інтенсифікація гідромеханічних і масообмінних процесів і ефективне диспергування, гомогенізація і емульгування. Ці гомогенізатори знайшли широке застосування для одержання вискодиспергованих стабільних емульсій з середнім розміром частинок від 50 нм до 1-2 мкм. РПА характеризуються високою продуктивністю, низькою енерго- і металоємністю, а також зниженням втрат сировини [7].

Високоєфективними і продуктивними пристроями з низькими питомими енерговитратами для обробки рідких емульсійних систем показали себе кавітаційні апарати різних конструкцій [7].

Кожен з розглянутих типів обладнання має свої переваги та недоліки. Рациональний вибір типу і конструкції апарату залежить від властивостей певних типів дисперсних систем, заданих характеристик готового матеріалу, реальних умов і виробничих можливостей підприємств, а також техніко-економічних розрахунків виробництва.

Проточні гідродинамічні кавітаційні апарати статичного типу представляють собою надійне високоєфективне обладнання нового покоління для розчинення, змішування, диспергування, емульгування і гомогенізації в дисперсних системах типу «рідина-рідина» або «рідина-тверда речовина». Відмінною ознакою цих апаратів є просторово-часова локалізація енергії, що дає можливість при порівняно низькому рівні енергії створювати направлені імпульси великої потужності. Використання гідродинамічної кавітації в обладнанні цього типу дозволяє інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Ефективність кавітаційних апаратів пов'язана з виникненням супутніх до явища кавітації ефектів, таких як ударні хвилі,

кумуляція, автоколивання, вібротурбулізація, дифузія і теплообмін, які виникають при утворенні, зростанні і колапсі бульбашок. В результаті, створюються умови для ефективного проходження гідромеханічних, фізичних і хімічних процесів на мікро- і нанорівнях. Основою великої кількості відомих статичних гідродинамічних кавітаційних апаратів проточного типу є трубка Вентурі. Її найважливішими характеристиками вважаються діаметр горловини сопла і кут розкриття дифузору. В меншій мірі важливим є кут розкриття конфузору. Хоча вплив геометрії трубок Вентурі на виникнення ефектів гідродинамічної кавітації вивчався багатьма дослідниками, кожна конкретна дисперсна система має свої фізико-хімічні особливості, тому вимагає проведення додаткових досліджень [7, 8].

Мета роботи – дослідження впливу особливостей геометрії конструкції сопла Вентурі в кавітаційних змішувачах на характеристику потоку при утворенні емульсійних систем, як основ легких емульсійних кремів.

Дослідження проводились на експериментальному стенді детально описаному в роботі [7, 9].

В якості кавітаційного реактору використовувалась з'ємна трубка Вентурі з кутом розкриття конфузора 90°, довжиною горловини сопла 20 мм і кутом розкриття дифузора 120°. Діаметр сопла змінювався від 0,004 м до 0,016 м.

Гідродинамічний тиск перед кавітатором, який створюється за допомогою відцентрових багатоступеневих насосів, контролювався манометрами і регулювався за допомогою запірної арматури в межах 0,1...0,5 МПа.

Технічні характеристики стенду:

Номинальна потужність ... 2,3 кВт,

Робочий об'єм приймального баку пристрою для розчину ... 15 л;

Номинальна напруга ... 380 В;

Частота току ... 50 Гц;

Режим роботи ... періодичний;

Кількість насосів ... 2;

Максимальна температура нагріву матеріалу в пристрої ... 55 °C.

В якості дослідної емульсійної основи для отримання емульсійних кремів використовувалась емульсія прямого типу «масло у воді», до складу якої входили: олія виноградної кісточки - 20% і полісорбат 80 – 10%, дистильована вода. Полісорбат 80 відноситься до ПАР неіоногенної групи, є емульгатором та солюбілізатором.

Таким чином, використана дослідна емульсія – це трикомпонентна система, що складається з полярної рідини (вода), неполярної рідини (олія) та емульгатора.

Якість отриманих емульсій оцінювали за такими характеристиками, як дисперсність і стійкість емульсії у часі.

Визначення дисперсності проводилось методом фотонної кореляційної спектроскопії на лазерному фотон-кореляційному спектрометрі “ZetaSizer-3” Malvern Instrument, Великобританія. Робота даного спектрометру основана на спектральному аналізі флуктуації інтенсивності статистично і динамічно розсіяного світла при проходженні лазерного променя через досліджуване середовище. Прилад обладнаний He-Ne лазером ЛГН-111 ($P=25$ мВт, $\lambda=633$ нм) з діапазоном вимірювання від 1 нм до 50 мкм [10].

Стійкість емульсії у часі визначали за швидкістю розшарування емульсії після її отримання. Швидкість розшарування емульсії розраховують, вимірюючи висоту (обсяг) фази, що відшарувалась, через певні проміжки часу.

Основні наукові результати

До початку обробки система з двох фаз, що не змішуються, знаходилась у термодинамічно стійкому стані і перебувала у вигляді двох суцільних шарів: верхнього (легша рідина) і нижнього (важча рідина). Під час проходження рідини через кавітаційний реактор здійснюється перетворення енергії низької концентрації на енергію високої локальної концентрації в нестійких точках структури і система стає кумулятивно-дисипативною. Суцільний шар олії починає подрібнюватись на окремі краплини, зростає міжфазна поверхня та вільна поверхнева енергія, а система стає термодинамічно нестійкою. Для її адаптації до зовнішнього впливу і зменшення енергії Гібса до мінімуму система набуває нових необхідних властивостей. В результаті відбувається мимовільна самоорганізація і утворення стійких мікро- і наноструктурних емульсій.

Ефективний гідродинамічний вплив, який створюється за рахунок виникнення кавітаційних ефектів на експериментальному стенді дозволяє зруйнувати структурні і міжмолекулярні зв'язки і отримати стійкі емульсії з розміром частинок до 1 мкм. Характеристика утворених емульсій залежить від конструкції апарата, теплотехнологічних параметрів проведення процесу і фізико-хімічних властивостей речовин, представлених в дисперсній системі.

Нами було досліджено вплив особливостей геометрії конструкції сопла Вентурі в статичних кавітаційних

змішувачах на характеристику потоку при утворенні емульсійних систем типу «олія у воді». Початкова температура дослідних зразків становила $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Основними показниками гідродинаміки в трубці Вентурі є швидкість течії рідини, що переміщається за одиницю часу через поперечний перетин трубки і характер течії рідини, що характеризується числом Рейнольдса. Характеристика витрат рідини усередині сопла кавітаційного реактору наведені на рис. 1.

Отримані результати (рис. 1) свідчать, що при використанні даного типу кавітаційного реактора із збільшенням діаметра сопла, тиск перед соплом зменшується через зменшення місцевого опору у вигляді сопла, витрати розчину збільшуються, швидкість потоку в соплі зменшується. Причому спостерігається майже пропорційна залежність між збільшенням діаметру і збільшенням витрат. Явище кавітації є характерним для великих швидкостей, тому що при зростанні швидкості збільшується розрідження потоку. Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати про зниження інтенсивності кавітаційної обробки зі збільшенням діаметра сопла.

Число Рейнольдса характеризує гідродинамічні умови в потоці і стан рідини. Число Рейнольдса для рідини, що тече в циліндричній трубці визначається рівнянням:

$$Re = V \cdot D \cdot \rho / \mu, \quad (1)$$

де V – середня швидкість потоку, м/с;

D – діаметр трубки, м;

μ – в'язкість, Па·с;

ρ – густина рідини, кг/м³.

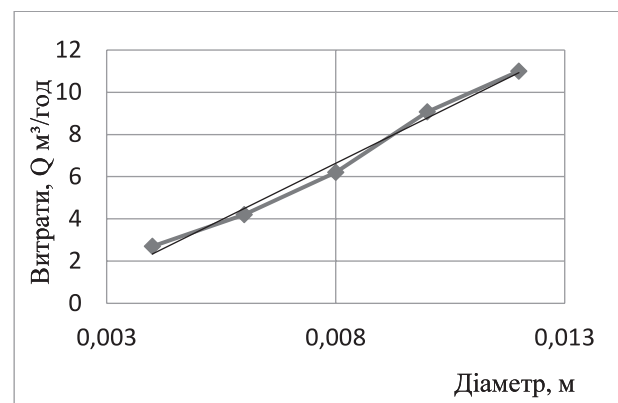


Рис. 1. Залежність витрат рідини від діаметра сопла

В умовах турбулентного і кавітаційного режимів у системі відрізняється її енергетичний розподіл. У першому випадку введення в рідину енергії викликає її турбулентне перемішування і характеризується нерівномірною зміною швидкості з часом, що супроводжується інтенсивним перемішуванням рідини з пульсаціями швидкостей та тисків, спостерігаються поперечні переміщення та обертальні рухи окремих об'ємів рідини. Гідродинаміка у кавітаційному режимі є складнішою. При цьому режимі поряд із утворенням у рідині крупномасштабних пульсацій, як при турбулентному режимі, одночасно відбуваються дрібномасштабні пульсації, утворення і зхлопування кавітаційних бульбашок, виникнення кумулятивних мікро струменів, зміна тисків і температур та інші кавітаційні ефекти. Режим характеризується розривом окремих струменів з утворенням парогазової фази. Потік перетворюється на двофазний [7].

Розрахунок числа Re (рис. 2) для руху потоку через сопло свідчить про наявність великих швидкостей і значної турбулізації. Із збільшенням діаметру сопла від 0,004 м до 0,012 м швидкість потоку зменшується, а число Рейнольдса збільшується. Подальше збільшення діаметру сопла призводить до поступового зменшення числа Re. Вважається, що чим вищим є число Рейнольда, тим меншим є розмір утворених кавітаційних пухирців і емульгування відбувається більш ефективно. Таким чином, збільшення діаметру сопла понад 0,012 м є недоцільним.

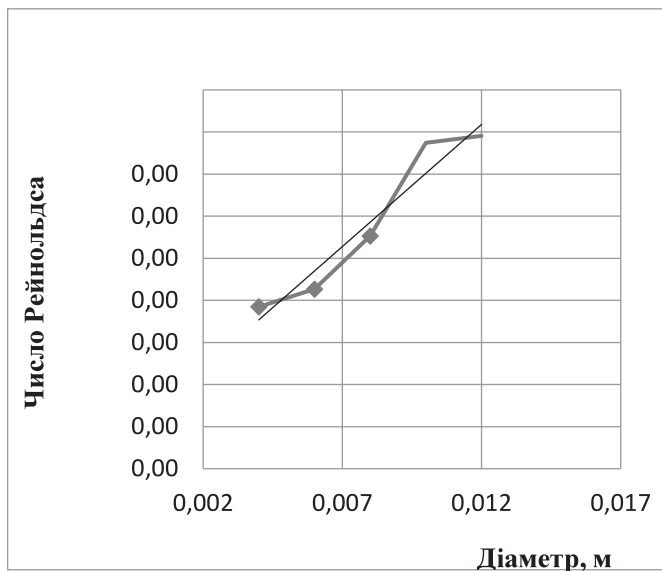


Рис. 2. Залежність числа Рейнольдса від діаметра сопла кавітаційного змішувача

В якості параметра для характеристики кавітаційних явищ в середині даного реактора використовувалось число кавітації, як один з найбільш важливих параметрів. Кавітаційне число розраховували за формулою 2:

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

де p – тиск перед соплом, Па;

v – швидкість течії в соплі, м/с;

$p_{\text{кав}}$ – мінімальний тиск в потоці, Па;

ρ – густина рідини, кг/м³.

На рис. 3 наведена залежність числа кавітації від діаметру сопла.

Вважається, що при числах кавітації $\chi > 2$ кавітація відсутня, при значеннях χ від 1,0 до 2,0 кавітація має місце, а найбільша інтенсивність кавітації при $\chi < 1$ [7, 8]. Наведені результати (рис.3) свідчать про те, що майже для всіх діаметрів горловини сопла число кавітації $\chi < 1$. Виключення становить сопло з діаметром 12 мм, при використанні якого потік характеризується найбільшим числом кавітації, $\chi = 1,01$. Це може свідчити про деяке зниження інтенсивності кавітаційного впливу при подальшому збільшенні діаметра сопла. Використання кавітаційних реакторів з соплом діаметром 4 мм і 6 мм, незважаючи на низькі кавітаційні числа і високу інтенсивність впливу гідродинамічної кавітації, потік характеризується дуже низькими витратами розчину, що призводить до низької продуктивності процесу

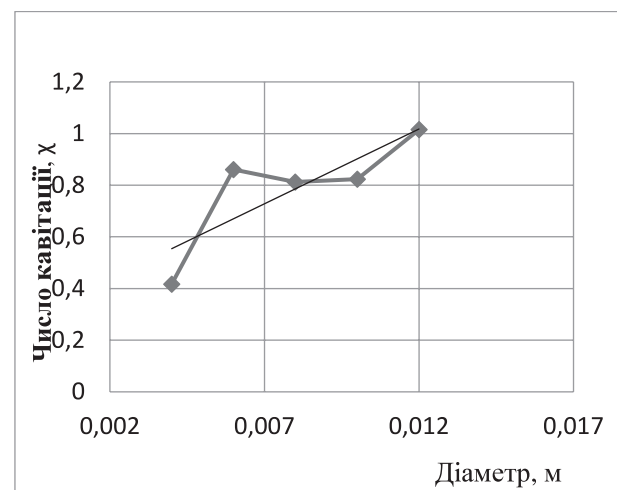


Рис. 3. Залежність числа кавітації від діаметру сопла

емульгування, збільшення тривалості і енерговитрат процесу, а також зниження якості отриманої емульсії. Отримані результати підтверджуються дослідженнями інших вчених [3, 8, 11].

З метою апробації ефективності роботи кавітаційного змішувача для отримання жирової основи при виробництві косметичних бальзамів для догляду за шкірою були проведені дослідження дисперсності і стабільності утворених дослідних зразків.

Дослідження дисперсності показали, що в результаті використання експериментального кавітаційного змішувача і запропонованих теплотехнологічних режимних параметрів обробки складної гетерогенної системи типу «масло у воді» утворилась мікроемульсія з діапазоном дисперсності частинок від 17 нм до 550 нм. Дисперсія носить одномодальний характер з піком на 72 нм. Кількість частинок з розміром до 100 нм, які вважаються найбільш стійкими, становить 86%.

З метою визначення стабільності системи утворена мікро емульсія зберігалась при $t = 4 \pm 2$ °C впродовж 14 діб. Після вказаного терміну визначення дисперсності було проведено повторно.

Повторні дослідження показали, що в результаті витримки утвореної мікроемульсії діапазон дисперсності частинок залишився майже незмінним – від 16 нм до 825 нм. Кількість частинок до 100 нм становить 83%. Кількість частинок з розміром більше 100 нм збільшилась незначно, що може свідчити про дуже високу стабільність емульсії.

Висновки

1. На основі аналізу результатів математичного моделювання для створення гідродинамічної кавітації були виготовлені і досліджувались кавітаційні реактори типу трубки Вентурі з такими геометричними параметрами: кут розкриття конфузора 90°, довжина горловини сопла 20 мм, кут розкриття дифузора 120°. Діаметр горловини сопла в кавітаційних реакторах змінювався від 4 мм до 16 мм.

2. На основі експериментальних даних було встановлено, що майже для всіх виготовлених зразків кавітаційних реакторів характерний інтенсивний вплив гідродинамічної кавітації. Про це свідчать високі значення числа Рейнольдса і низькі значення числа кавітації. Найбільш раціональним є використання кавітаційного реактора з діаметром горловини сопла 8 мм.

3. Експериментальний статичний кавітаційний змішувач проточного типу дозволяє отримати якісні, стійкі у зберіганні емульсійні препарати нанодіапазону.

4. Косметичний емульсійний препарат, виготовлений на експериментальному обладнанні характеризується високодисперсною структурою з переважною більшістю частинок з розміром до 100 нм – 86% і стабільністю утвореної дисперсії при зберіганні впродовж 14 діб при $t = 4 \pm 2$ °C.

5. Одержані результати будуть використані для розроблення рекомендацій для проектування ефективних трубок Вентурі для отримання стабільних мікро- і наноемульсій.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Emulsions and emulsion stability* /Ed.J.Sjöblom. CRC Press Taylor& Francis Group. 2006. 669 p. DOI:10.1201/9781420028089.
2. *Drapala, K. P., Auty, M. A., Mulvihill E.* Influence of lecithin on the processing stability of model whey protein hydrolysate-based infant formula emulsions. *International Journal of Dairy Technology*. 2015.68(3), P.322-333. DOI:10.1111/1471-0307.12256
3. *Hakansson A.* Emulsion Formation by Homogenization: Current Understanding and Future Perspectives *Food Science Technology*. 2019. 10:239–258. DOI: 10.1146/annurev-food-032818-121501
4. *Bylund G.* Dairy processing handbook Tetra Pak. 2015. 486 p. ISBN-10: 9176111326
5. *Guan X., Yang N., Nigam K.* Prediction of Droplet Size Distribution for High Pressure Homogenizers with Heterogeneous Turbulent Dissipation Rate. *Industrial&Engineering Chemistry Research*. 2020, 59 (9), 4020-4032. DOI:10.1021/acs.iecr.9b04615
6. *Zhang Sh.B., Zhang Sh. Y., Peng Y. X.* Comparative study of high-intensity ultrasound and high-pressure homogenization on physicochemical properties of peanut protein-stabilized emulsions and emulsion gels. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. DOI: 10.1111/jfpe.13710.
7. *Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.* Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: «Наук. Думка», 2020, 112 с.
8. *Adrien M., Bronson B.M., Xu Zh., Liu Q.* Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V. 132, 2019, P. 268-274. DOI:10.1016/j.mineng.2018.11.001
9. *Долінський А.А.* Явище гідродинамічної кавітації як дієвий механізм диспергування при реалізації дискретно-імпульсного введення енергії

/ А.А. Долінський, Л.Ю. Авдєєва, Е.К.Жукотський, А.А.Макаренко// Промышленная теплотехника, 2015.- Т.37, №6.-С.16-21.

10. *Yegin B.* Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy. *International Journal of Pharmaceutics*. 2006. № 320 (1-2). P. 165–170. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2006.04.014.

11. *Mossaz S., Colombet D., Ayela F.* Hydrodynamic cavitation of binary liquid mixtures in laminar and turbulent flow regimes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 80. 2017. P. 337-347. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2016.08.001.

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC CAVITATION EFFECTS ON THE PROPERTIES OF COMPLEX MULTICOMPONENT SYSTEMS

Avdieieva L.Yu.¹, Pavlyk V.Yu.²

¹*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, Mary Kapnist str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine, avdeeva22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Master of the 2nd year, 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.3>

Emulsions have high efficiency and biological activity, easy absorption, and high digestibility, because they include extracts and parts of medicinal plants, essential oils, vitamin and mineral complexes. They are widely used in medicine, pharmaceutical, chemical and food industries, as well as agriculture. At the same time, the treatment of liquid multicomponent heterogeneous systems to obtain stable micro- and nano emulsions is a long and energy-intensive process.

Modification or replacement of obsolete energy-intensive technological processes and equipment to increase their efficiency is one of the main problems of modern production.

Various cavitation devices have proven to be highly efficient and productive with low energy consumption when producing high-quality liquid emulsion systems.

Streaming hydrodynamic cavitation devices of the static type based on the Venturi tube are reliable high-performance equipment and are widely used for the formation of microemulsions by hydrodynamic cavitation. Although the influence of Venturi tube geometry on the occurrence of hydrodynamic cavitation has been widely studied, there is no clear relationship between cavitation and Venturi tube geometry parameters.

The aim of this work was to study the influence of the geometry features of the Venturi nozzle design in cavitation mixers on the flow characteristics in the formation of emulsion systems as the basis of light emulsion creams.

The presented results of experimental studies describe the influence of the geometry features of the Venturi nozzle design on the flow characteristics during the formation of emulsion systems in static cavitation mixers. Flow rate, flow velocity, Reynolds number and cavitation number are defined among the characteristics of hydrodynamics of the flow. The quality of the obtained emulsions is evaluated by dispersion and stability of the emulsion over time.

References 11, figures 3.

Key words: cavitation, hydrodynamics, Venturi nozzle, cavitation mixer, emulsion.

1. *Emulsions and emulsion stability* /Ed.J.Sjöblom. CRC Press Taylor& Francis Group. 2006. 669 p. DOI:10.1201/9781420028089.

2. *Drapala, K. P., Auty, M. A., Mulvihill E.* Influence of lecithin on the processing stability of model whey protein hydrolysate-based infant formula emulsions. *International Journal of Dairy Technology*. 2015.68(3), P.322-333. DOI:10.1111/1471-0307.12256

3. *Hakansson A.* Emulsion Formation by Homogenization: Current Understanding and Future Perspectives *Food Science Technology*. 2019. 10:239–258. DOI: 10.1146/annurev-food-032818-121501

4. *Bylund G.* Dairy processing handbook Tetra Pak. 2015. 486 p. ISBN-10: 9176111326

5. *Guan X., Yang N., Nigam K.* Prediction of Droplet Size Distribution for High Pressure Homogenizers with Heterogeneous Turbulent Dissipation Rate. *Industrial&Engineering Chemistry Research*. 2020, 59 (9), 4020-4032. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b04615.

6. *Zhang Sh.B., Zhang Sh. Y., Peng Y. X.* Comparative study of high-intensity ultrasound and high-pressure homogenization on physicochemical properties of peanut protein-stabilized emulsions and emulsion gels. *Journal of Food Process Engineering*.2021. DOI: 10.1111/jfpe.13710.

7. *Dolinskiy A.A., Avdieieva L., Makarenko A.A.* [Cavitation technologies for the production of nanopreparations]. – Kyiv: Nauk. Dumka. 2020. 112 p. (in Ukr.)

8. *Adrien M., Bronson B.M., Xu Zh., Liu Q.* Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V. 132, 2019, P. 268-274. DOI:10.1016/j.mineng.2018.11.001.

9. *Dolinskiy A.A., Avdieieva L., Makarenko A.A.* [The phenomenon of hydrodynamic cavitation as an effective dispersion mechanism in the implementation of discrete-pulse energy input]. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*. 2015. V. 37. № 6. P. 16-21. (in Ukr.)

10. *Yegin B.* Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy. *International Journal of Pharmaceutics*. 2006. № 320 (1-2). P. 165–170. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2006.04.014.

11. *Mossaz S., Colombet D., Ayela F.* Hydrodynamic cavitation of binary liquid mixtures in laminar and turbulent flow regimes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 80. 2017. P. 337-347. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2016.08.001.

Отримано 16.05.2022

Received 16.05.2022

УДК 620.92

АНАЛІЗ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПОВНОЇ ВІДМОВИ УКРАЇНИ ВІД РОСІЙСЬКОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Гелету́ха Г.Г., докт. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Драгнєв С.В., 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/ttpe.2.2022.4>

Сформульовано кроки для досягнення Україною незалежності від російського природного газу. Проведено оцінку прогнозованих обсягів скорочення споживання або заміщення газу до 2030 р. та 2050 р. Визначено організаційні та законодавчі заходи для реалізації запропонованих кроків по відмові від російського природного газу в Україні.

Actions for Ukraine to achieve independence of Russian natural gas are formulated. The projected volumes of natural gas consumption reduction or replacement by 2030 and 2050 are estimated. Organizational and legislative measures to implement the proposed actions for Ukraine to reject Russian natural gas are determined.

Бібл. 15, табл. 2.

Ключові слова: відновлювана енергетика, відновлювані джерела енергії, біомаса, біометан, декарбонізація, енергоефективність.

АЕС – атомна електростанція;
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
МАГАТЕ – міжнародне агентство з атомної енергії;
НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики;
ПГ – природний газ;
ПСГ – підземні сховища газу;

СЕС – сонячна електростанція;
ТЕЦ – теплоелектроцентрально;
ТЕС – теплова електростанція;
ФЕС – фотоелектростанція;
ЦТ – централізоване теплопостачання;
н.е. – нафтовий еквівалент.

Вступ

На початку березня 2022 р. Міжнародне енергетичне агентство запропонувало низку конкретних кроків, які може реалізувати ЄС для скорочення імпорту російського природного газу більш ніж на третину вже до кінця 2022 р. Паралельно з цим, Європейська Комісія представила концепцію плану «Перезарядка ЄС» (REPowerEU). Мета цього плану – досягти повної незалежності Європи від викопних палив з Росії, починаючи з природного газу, задовго до 2030 року. Зазначені приклади мають стати в нагоді Україні для розробки власної програми скорочення споживання газу та інших викопних палив і практичної реалізації «зеленого» енергетичного переходу.

Метою роботи є визначення та аналіз найбільш ефективних заходів для України для досягнення повної відмови від російського природного газу. **Методи дослідження** включають проведення техніко-економічних розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Запропоновані кроки для досягнення Україною незалежності від російського природного газу

Заміщення природного газу твердими біопаливами при виробництві теплової енергії

Річне споживання природного газу в Україні складає близько 28 млрд м³, а обсяг власного видобування – порядку 20 млрд м³/рік [1]. Імпорт газу виконується зі Словаччини, Угорщини та Польщі. Юридично імпортований газ не є російським, але фактично – так. Для повної відмови від цього імпорту вважаємо за необхідне реалізувати прискорену заміну газових котлів на котли на біомасі і запобігати встановленню індивідуальних газових котлів в квартирах і домогосподарствах.

Перехід на біомасу і тверді біопалива при виробництві теплової енергії – один з найрентабельніших шляхів заміщення ПГ, особливо враховуючи нинішні і прогнозовані високі ціни на природний газ в ЄС, звідки Україна наразі його закуповує. Проектом Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до

2030 року передбачено виробництво 10328 тис. т н.е. теплової енергії з біомаси у 2030 р., у тому числі 9328 тис. т н.е. – з твердої біомаси, 1000 тис. т н.е. – з біогазу [2].

Реальність розвитку даного напрямку демонструють вже досягнуті високі частки теплової енергії, що виробляється з ВДЕ, переважно з біомаси, у багатьох країнах ЄС: Швеція – 66%, Естонія та Фінляндія – 58%, Латвія – 57%, Португалія – 42% [3]. В середньому по ЄС частка ВДЕ в системах опалення і охолодження становить 23%, що майже вдвічі вище цього показника у 2004 р. (12%).

Сценарій впровадження біоенергетичного обладнання, розроблений в Дорожній карті розвитку біоенергетики в Україні до 2050 року [4], дає можливість загального заміщення природного газу в обсязі 9,2 млрд м³/рік в 2030 р. і 19 млрд м³/рік в 2050 р. Найбільший внесок у це заміщення вноситиме тверда біомаса; внесок від встановлення котлів (побутових, промислових, в ЦТ і бюджетній сфері) полягає у додатковому заміщенні 2,7 млрд м³/рік ПГ в 2030 р. і 9,3 млрд м³/рік в 2050 р. порівняно з показником 2020р. Аналогічна оцінка для ТЕЦ на твердій біомасі – 0,8 млрд м³/рік ПГ в 2030 р. і 2,0 млрд м³/рік в 2050 р.

Подальше будівництво вітрових і сонячних електростанцій

Одна з ключових цілей проєкту НПДВЕ 2030 року – досягнення 25% ВДЕ у валовому кінцевому споживанні електроенергії. Документом передбачено значний ріст встановленої потужності сонячних ФЕС і ВЕС – до 9947 МВт і 5033 МВт у 2030 р., відповідно. Порівняно з показниками 2020 р. (6872 МВт СЕС і 1314 МВт ВЕС), це є зростанням у 1,5 разів для сонячних ФЕС і у 3,8 разів для ВЕС. Особливістю розвитку вітроенергетики України у період з 2028 р. буде будівництво офшорних ВЕС – до 2030 р. планується досягти встановленої потужності 300 МВт [2].

Ріст обсягів виробництва електроенергії вітровими та сонячними електростанціями вимагає відповідного збільшення високоманеврових потужностей. Такі потужності, переважно, працюють на природному газі, що означає його додаткове споживання порівняно до вже існуючого. Для подальшого сталого розвитку «зеленої» електроенергетики в Україні необхідно впровадження [5]:

- Мінімум 1 ГВт високоманеврових потужностей зі швидким стартом (повна активація з зупиненого стану – не більше 15 хвилин, можливість здійснювати пуск та зупинку не менше чотирьох разів за добу з діапазоном регулювання не менше 80% від встановленої потужності). Водночас для максимізації виробництва електроенергії

з ВДЕ і, відповідно, максимального зменшення його обмежень доцільно побудувати не менш 2 ГВт високоманеврових потужностей.

- 0,5 ГВт систем акумулювання електроенергії за умови залучення ВДЕ до балансування енергосистеми та надання резервів. Без залучення ВДЕ до балансування або вимушеного обмеження потужностей АЕС, потреба в системах акумулювання електроенергії може зрости до 2 ГВт.

Природний газ на високоманеврових потужностях з можливістю швидкого запуску доцільно замінити біометаном, виробленим в Україні. Проєкт НПДВЕ 2030 передбачає збільшення застосування біометану на генеруючих установках, що використовують природний газ, з 50 ГВт-год у 2025 р. до 500 ГВт-год у 2030 р. (по виробленій електроенергії). За оцінками авторів, застосування біометану на високоманеврових потужностях має розвиватися навіть динамічніше: з 22 ГВт-год у 2022р. (за обсягом виробленої електроенергії, що відповідає 20 МВт встановленої потужності) до 745 ГВт-год (360 МВт) у 2030 р.

Виробництво біометану

Потенційно, Україна може виробляти до 10 млрд м³ біометану/рік, переважно з аграрних відходів і залишків: гній, послід, солома злакових, стебла кукурудзи, стебла соняшника, жом цукрових буряків, меляса, силос кукурудзи, а також побутові відходи та ін. [6]. За проведеними оцінками, реально досягти виробництва біометану в Україні обсягом 1 млрд м³ у 2030 р. і 4,5 млрд м³ у 2050р. З них для споживання на ТЕЦ можна запланувати 0,23 млрд м³ у 2030 р. і 0,79 млрд м³ у 2050 р.

Біометан є абсолютно готовим для закачування в газову мережу вже сьогодні. Не потрібні інвестиції у модернізацію газових мереж і газового обладнання (газові пальники та арматура, газопоршневі двигуни і газові турбіни). Україна має найбільшу в Європі площу сільськогосподарських угідь, і, відповідно, один із найкращих в світі потенціалів аграрної сировини для виробництва біометану. У даній сфері Україна може конкурувати з будь-якими країнами світу, пропонуючи найдешевшу сировину для отримання біометану. Біометанові заводи, окрім самого біометану, генерують дигестат, який може стати основним органічним добривом для відродження українських ґрунтів.

Підвищення рівня гнучкості і декарбонізації енергосистеми України

Наразі Україна має один з найнижчих в світі рівнів гнучкості енергосистеми, що є технічним бар'єром для подальшого розвитку вітрової і сонячної генерації. Для подолання цього бар'єру необхідне будівництво нових

накопичувачів енергії та маневрених потужностей на природному газі і біометані. Планується використання як газопоршневих, так і газотурбінних електрогенеруючих потужностей. Основною перешкодою для розвитку маневреної газової генерації вважається відсутність достатньої кількості природного газу власного видобутку. Тобто, для нової маневреної газової генерації знадобиться додатковий ресурс газу, якого в країні немає і доведеться імпортувати за високої ціною.

Вважаємо, що необхідна для маневреної генерації додаткова кількість природного газу може буде скорочена та замінена в секторі виробництва теплової енергії та інших секторах, розглянутих в даній статті. При цьому, за рахунок використання біометану одночасно можливо підвищити гнучкість і рівень декарбонізації енергосистеми.

Підвищення енергоефективності в системах ЦТ, будівлях і промисловості

На сьогодні рівень енергоефективності України у 3-5 разів нижче країн ЄС. Якби Україна мала рівень енергоефективності, наприклад, як у сьогоднішньої Польщі, то могла б взагалі відмовитися від імпорту енергоносіїв і стати енергетично незалежною державою.

Одним з наслідків війни в Україні є велика кількість повністю або у значній мірі зруйнованих будинків і підприємств. Спорудження нових будинків у післявоєнний період має виконуватися із врахуванням сучасних вимог до енергетичної ефективності будівель. Будівництво нових промислових підприємств або реконструкція зруйнованих повинно реалізовуватися із впровадженням на них сучасних технологій (якщо старі вже не підлягають відновленню). Реалізація заходів з підвищення енергоефективності є одним із важливих шляхів до скорочення споживання природного газу в Україні.

Заміщення російських поставок природним газом з інших джерел

Протягом 2016-2020 рр. Україна імпортувала значні обсяги природного газу (10-15 млрд м³/рік). У 2021 р. імпорт газу значно скоротився – до 2,6 млрд м³, що у 6 разів менше порівняно з 2020 роком [7]. Основними причинами різкого скорочення імпорту у 2021 р. були суттєве зростання вартості ПГ на світових ринках, певне падіння його споживання в Україні, а також наявні запаси у газових сховищах, перехідні з попереднього опалювального сезону. Прогнозуємо, що потреби в імпорті природного газу повернуться на рівень до 8 млрд м³/рік при стабілізації ситуації в Україні щодо війни і епідемії ковіду.

Через військову агресію Російської Федерації проти України, країни ЄС планують відмовитися від російського природного газу і вже активно шукають альтернативні джерела постачання газу. Це, ймовірно, призведе до зростання конкуренції між споживачами на ринку ПГ і може вплинути на можливості або умови експорту газу до України. Таким чином, опція заміщення російського газу альтернативними джерелами постачання, яка в ЄС розглядається як пріоритетна, для України навряд чи є такою. Будівництво терміналів скрапленого газу в Чорному морі наразі є проблематичним як із-за воєнних дій, так і із-за незгоди Туреччини на проходження газовозів через Босфорський пролив. Крім того, в умовах дефіциту на світовому ринку природного газу, особливо в умовах потенційного ембарго Росії, Україні буде вкрай важко виграти конкуренцію з іншими країнами і знайти нові джерела постачання ПГ.

Впровадження теплових насосів

В результаті зупинки значної частини промисловості на територіях бойових дій в Україні виник профіцит виробленої електроенергії (переважно атомної і вугільної). В цих умовах часткова «електрифікація» сектору теплопостачання з використанням теплових насосів представляється логічним і виправданим кроком. При цьому, мова йде про теплові насоси для окремих приватних будинків, для автономних систем в окремих багатопверхових будинках і у системах ЦТ. Враховуючи, що електроенергія, що використовується для приводу теплових насосів, ставатиме все більш «зеленою», тепла енергія, яку вони вироблятимуть, також ставатиме все більш відновлюваною і декарбонізованою. Вважаємо, що котли і ТЕЦ на біомасі разом з тепловими насосами становитимуть основу майбутніх систем теплопостачання України.

Проектом НІДВЕ 2030 передбачено виробництво 700 тис. т н.е. теплової енергії тепловими насосами у 2030 році, у тому числі аеротермальними – 460 тис. т н.е., геотермальними – 160 тис. т н.е., гідротермальними – 80 тис. т н.е. Таким чином, до 2030р. планується ріст виробництва теплової енергії тепловими насосами у 13,5 разів порівняно з 2020 р. (52 тис. т н.е.) [2].

Продовження термінів експлуатації існуючих атомних електростанцій

Наразі атомні електростанції забезпечують більше половини потреби України в електричній енергії. За даними 2020 р., із загальних вироблених 137197 ГВт·год, 52% (71249 ГВт·год) було генеровано на АЕС [8]. Проектний термін експлуатації енергоблоків АЕС України становить 30 років і до 2019 року вже був вичерпаний на

всіх діючих енергоблоках, крім п'яти. За інформацією Міністерства енергетики України [9], експертні оцінки ситуації щодо виробництва електроенергії в Україні свідчать, що у разі прийняття рішення про виведення з експлуатації енергоблоків АЕС, які відпрацювали відведений проєктом термін, та за відсутності на той час заміщуючих потужностей, у країні може статися енергетична криза. Як показує світовий досвід, продовження термінів експлуатації енергоблоків АЕС за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки є одним із найбільш ефективних шляхів часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей.

В умовах дефіциту газу і вугілля, а також значних екологічних проблем, що створює вугільна генерація, максимально можливе подовження термінів експлуатації існуючих АЕС (з відповідним дозволом МАГАТЕ) представляється логічним і економічно обґрунтованим. Це відповідає цілям чинної Енергетичної стратегії України і Комплексній програмі робіт з продовження терміну експлуатації діючих енергоблоків АЕС [10]. Проте, будівництво нових АЕС в Україні вважаємо недоцільним, оскільки існуючі і нові сонячні та вітрові електростанції, при їх балансуванні маневреною газовою генерацією і накопичувачами енергії, можуть забезпечити більш дешеве виробництво електроенергії, ніж новозбудовані АЕС.

Заохочення споживачів до тимчасового зниження температури у приміщеннях на 1°C

Середня температура у опалювальних приміщеннях у країнах ЄС становить сьогодні понад 22°C [11], що дозволяє без суттєвого впливу на комфорт зменшити її, щонайменше, на 1°C. В Україні досить часто житлові приміщення також опалюють до температури вище 22°C, про що свідчить відкриття вікон для охолодження помешкань. Згідно стандартів надання послуг з опалення в Україні, температура повітря в житлових приміщеннях має становити 18°C, а у кутових кімнатах – 20°C [12]. Тому аналогічні заходи щодо заохочення споживачів до тимчасового зниження температури у приміщеннях на 1°C можна запровадити і в Україні.

Одним з найменш витратних і найбільш ефективних методів регулювання тепла в квартирі є встановлення радіаторних терморегуляторів на кожен опалювальний прилад, що є у приміщеннях. Крім того цей захід дозволить домогосподарствам заощадити кошти на оплату енергоносіїв. Аналогічні енергозберігаючі заходи доцільно реалізовувати також в офісних та інших приміщеннях, крім, приміщень де необхідно забезпечувати інші температурні параметри (лікарні, школи,

дитячі садочки тощо). При цьому температуру опалення можна ще зменшувати у вихідні та періоди часу, коли у приміщеннях немає людей.

Зменшення температури в приміщеннях на 1 градус дозволяє економити до 6% теплової енергії. Таким чином, враховуючи витрати природного газу 2020 р. у теплоцентралях та побутовому секторі без витрат газу на приготування їжі, орієнтовні обсяги скорочення споживання газу в Україні від реалізації описаного заходу складуть до 0,7 млрд м³ ПГ на рік.

Запровадження зобов'язань щодо зберігання природного газу

Можна констатувати, що даний захід в значній мірі вже реалізовано в Україні і він є більш актуальним і нагальним для Європейського Союзу. Мережа підземних сховищ природного газу – важливий елемент енергетичної системи України. Їх стала та безперебійна робота необхідна для успішного проходження опалювальних сезонів, функціонування промислових підприємств та виконання зобов'язань перед іноземними партнерами. Загальна активна місткість українських ПСГ – понад 30 млрд м³. Це найбільші сховища в Європі (21% загального обсягу) та треті за обсягами у світі – після США та Росії. Такі потужності дають Україні значні можливості не тільки для забезпечення власних потреб, але і для залучення клієнтів зі зберігання газу, зокрема європейських.

На початок опалювального сезону 2021/2022 рр. в ПСГ України було накопичено 18,7 млрд м³ природного газу, що є достатнім для повного забезпечення опалювального сезону. Середній рівень наповнення ПСГ України на початок сезону відбору у період 2012-2021рр. складав 18,8 млрд м³ [13].

Оцінка прогнозованих обсягів скорочення споживання та заміщення природного газу в Україні від реалізації запропонованих кроків

Узагальнюючі оцінки ефекту від реалізації запропонованих вище заходів виконано на основні прогнозних показників розвитку ВДЕ, енергоефективності і енергетики у відповідності до програмних документів України і експертних оцінок авторів.

Як видно з результатів розрахунків (табл. 1), при прогнозованих планах розвитку до 2030 р. Україна здатна повністю скоротити/замістити імпортований природний газ у обсягах до 10 млрд м³/рік і стати повністю енергонезалежною щодо нього. Проте, термін досягнення цього скорочення/заміщення, закладений в програмних документах України, видається надто великим. У нинішній політичній і економічній ситуації, на яку значно вплинули військові дії з боку Росії, ці програмні

документи потребують корегування. Вважаємо, що ціль повної енергонезалежності щодо природного газу потрібно досягати значно раніше, максимум протягом кількох років. У довготривалій перспективі до 2050 р., згідно оцінок авторів, Україна здатна скоротити споживання або замінити майже 26 млрд м³/рік природного газу.

Організаційні та законодавчі заходи для реалізації запропонованих кроків по відмові від російського природного газу в Україні

Реалізація кожної із представлених дій по скороченню споживання/заміщенню природного газу в Україні потребує низки конкретних організаційних та законодавчих заходів (табл. 2). Значною мірою ці заходи збігаються з тими, що необхідні для подолання бар'єрів

на шляху розвитку біоенергетики та розширення ЦТ в Україні [14, 15]. Наприклад, для широкого заміщення природного газу біомасою та твердим біопаливом у виробництві тепла необхідно запровадити систему електронної торгівлі твердим біопаливом за допомогою електронних аукціонів; подальше будівництво вітрових та сонячних електростанцій вимагає проведення аукціонів з державної підтримки проєктів виробництва «зеленої» електроенергії; підвищення рівня гнучкості та декарбонізації енергосистеми України потребує запровадження аукціонів для маневрових потужностей і систем акумулювання електроенергії, а також зняття штучних обмежень на вартість послуг з балансування енергосистеми.

Табл. 1. Прогнозовані обсяги скорочення та заміщення споживання природного газу в Україні від реалізації запропонованих заходів.

Найменування заходу	Прогнозовані обсяги скорочення споживання / заміщення ПГ, млрд м ³ /рік	
	до 2030 р.	до 2050 р.
Заміщення природного газу біомасою і твердими біопаливами при виробництві теплової енергії	3,0	10,3
Подальше будівництво вітрових і сонячних електростанцій	1,7	3,5
Виробництво біометану	0,8	3,7
Підвищення рівня гнучкості і декарбонізації енергосистеми України за рахунок біометану	0,2	0,8
Підвищення енергоефективності в системах ЦТ, будівлях і промисловості	2,8	5,6
Впровадження теплових насосів	0,8	1,2
Заохочення споживачів до тимчасового зниження температури у приміщеннях на 1°C	0,7	0,7
Всього	10,0	25,8

Табл. 2. Необхідні заходи для реалізації запропонованих кроків по заміщенню російського природного газу в Україні

Найменування кроку	Основні організаційні та законодавчі заходи
Заміщення природного газу біомасою і твердими біопаливами при виробництві теплової енергії	• Увести ринкову ціну на природний газ для всіх категорій споживачів, включаючи населення та виробників тепла. • Запровадити систему електронної торгівлі твердим біопаливом за допомогою електронних аукціонів із забезпеченням стандартів якості і гарантій постачання біопалива. • Запровадити систему державної підтримки компаніям, що вирощують енергетичні рослини. • Звільнити від сплати податку за викиди CO₂ установки, що спалюють тверде біопаливо і біогаз/біометан.

Подальше будівництво вітрових і сонячних електростанцій	• Забезпечити фінансову стабільність Гарантованого покупця. • Увести ринкову ціну на електроенергію для всіх категорій споживачів, включаючи населення. Захист вразливих верств населення через систему монетизованих субсидій. • Надати право виробникам електроенергії з ВДЕ виходити з балансуєної групи Гарантованого покупця та вільно продавати електроенергію на ринку з можливістю отримання компенсації (контракти на різницю). • Якнайшвидше розпочати проведення аукціонів з державної підтримки проєктів з виробництва електроенергії з ВДЕ. • Розробити та запровадити механізм гарантії походження електроенергії, виробленої з ВДЕ. • Розробити регуляторне поле, що дозволить реалізувати прямі договори з постачання електроенергії, виробленої з ВДЕ, до споживачів. • Розробити регуляторне середовище для будівництва об'єктів ВДЕ для власного споживання виробленої електроенергії. • Затвердити Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року.
Виробництво біометану	• Запровадити систему видачі гарантій походження для біометану. • Створити Реєстр біометану. • Зняти вимогу обов'язкової державної реєстрації для дигестату. • Розробити і затвердити національний стандарт на дигестат при використанні його як органічного добрива чи поліпшувача ґрунту. • Затвердити прийнятні для біометану вимоги щодо вмісту кисню (0,2...1%) у технічному регламенті природного газу.
Підвищення рівня гнучкості і декарбонізації енергосистеми України	• Якнайшвидше розпочати проведення аукціонів для маневрових потужностей і систем акумулювання електроенергії. • Зняти штучні обмеження на вартість послуг з балансування енергосистеми.
Підвищення енергоефективності в системах централізованого теплопостачання, будівлях і промисловості	• Повномасштабна реформа податку на CO₂ із переходом до енергетичного податку із оподаткуванням вмісту вуглецю у паливі у момент надходження на митну територію України або першого продажу. • Створення фонду декарбонізації. • Запровадження конкурентного ринку теплової енергії в системах ЦТ. • Забезпечення недискримінаційного доступу незалежних виробників до теплових мереж ЦТ. • Запровадження принцип зонування території при розробці міських схем теплопостачання. • Уведення адміністративної заборони на від'єднання споживачів від систем ЦТ у зонах ЦТ. • Надання схемам теплопостачання статусу обов'язкових для розробки та виконання.
Впровадження теплових насосів	• Уведення ринкової ціни на природний газ для всіх категорій споживачів, включаючи населення і виробників теплової енергії. • Запровадження стимулюючих тарифів на електроенергію для теплових насосів, включаючи «нічні» тарифи.

Висновки та рекомендації

Вважаємо, що Україні потрібно якнайшвидше розробити дієву і амбітну програму відмови протягом кількох років від російського газу, вугілля, нафти та нафтопродуктів. За оцінками авторів, це реальним і економічно обґрунтованим. Така програма знадобиться одразу після завершення воєнних дій і має стати основою відновлення енергетики України, в тому числі програми підтримки такого відновлення зі сторони колективного Заходу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Енергетичний баланс* України за 2020 рік. Державна служба статистики України, 2021.
<http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. *Проект Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року*. Держенергоефективності, 2022. <https://sae.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii>
3. *Renewables steadily increasing in heating and cooling*. Eurostat, 2022.
<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/edn-20220211-1>
4. Geletukha G., Zheliezna T. Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050 // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021, v. 22 (5), p. 73-81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>
5. *Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році*. НЕК «Укренерго», 2021.
<https://ua.energy/zagalni-novyny/nkrekp-zatverdyla-zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-generatsiyi-u-2020-rotsi/>
6. *Biomethane zoning and assessment of the possibility and conditions for connecting of biomethane producers to the gas transmission and distribution systems of Ukraine*. Final Report for EBRD, 2021.
<https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/BM-Zoning-Final-Report-version-2022-02-01.pdf>
7. Ілона Сологуб. Споживання газу в Україні та його ціна. Вокс Україна, 18.02.2022.
<https://voxukraine.org/spozhyvannya-gazu-v-ukrayini-ta-jogo-tsina/>
8. *Статистичний щорічник* України за 2020 рік. Державна служба статистики України, 2021.
http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Yearbook_2020.pdf
9. *Продовження термінів експлуатації енергоблоків українських АЕС*. Міністерство енергетики України.
http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=244916068
10. *Про організацію виконання Комплексної програми робіт щодо продовження строку експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій*. Наказ Міністерства палива та енергетики України № 340 від 21.06.2004. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0340558-04#Text>
11. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*. IEA, 03.03.2022.
<https://bit.ly/38LZhQ0>
12. *Правила надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення*. Постанова КМУ № 630 від 21.07.2005 (із змінами).
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/630-2005-%D0%BF#Text>
13. *Зберігаємо енергію задля вашої безпеки*. Брошура Оператора газосховищ України, 2021. <https://bit.ly/3EqjpmB>
14. Георгій Гелетуха. Потенціал, сучасний стан та перспективи впровадження біоенергетичних проєктів в Україні. Презентація на вебінарі «Відновлювані джерела енергії для декарбонізації: біоенергетика», 26.02.2021. <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/eu4usociety-geletukha-bioenergy.pdf>
15. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Баштовий А.І. Перспективи декарбонізації централізованого теплопостачання України // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2021, т. 43, № 3, с. 44-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.6>

ANALYSIS OF ACTIONS FOR UKRAINE TO COMPLETELY REJECT RUSSIAN NATURAL GAS

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., 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/ttpe.2.2022.4>

The aim of the work is to identify and analyse the most effective measures for Ukraine to completely reject Russian natural gas. The annual consumption of natural gas in Ukraine is about 28 billion m³, while the volume of its own production makes up around 20 billion m³/year. In recent years, Russian gas has been imported from Slovakia, Hungary and Poland. To achieve Ukraine's independence of Russian natural gas, it is proposed to implement ten actions: replacement of natural gas with biomass and solid biofuels for heat production; further construction of wind and solar power plants; production of biomethane; increasing the flexibility and level of decarbonization of Ukraine's energy system; improving energy efficiency in district heating systems, buildings and industry; substitution of Russian supplies with natural gas from other sources; introduction of heat pumps; extension of the service life of existing nuclear power plants; encouraging consumers to temporarily reduce the room temperature by 1°C; introduction of natural gas storage obligations. The implementation of the suggested actions may provide projected reductions in the consumption or replacement of natural gas in the amount of 10 billion m³/year by 2030 and 25.8 billion m³/year by 2050. Among these actions, switching to biomass and solid biofuels for heat production could replace 3 billion m³/year by 2030 and 10.3 billion m³/year by 2050. The production and consumption of biomethane might substitute 0.8 and 3.7 billion m³/year of gas in 2030 and 2050, respectively. A number of required organizational and legislative measures have been formulated to implement the proposed actions to replace Russian natural gas in Ukraine. When the military operations end, Ukraine will urgently need to elaborate an effective and ambitious program to reject Russian gas, coal, oil and oil products within several years.

References 15, tables 2.

Keywords: renewable energy, renewable energy sources, biomass, biomethane, decarbonization, energy efficiency.

1. *Energetychnyi balans* Ukrayiny za 2020 rik. [Energy balance of Ukraine, 2020.]. State Statistics Service of Ukraine, 2021. (Ukr.) <http://www.ukrstat.gov.ua/>

2. *Proyekt Nacionalnogo planu dii z vidnovlyuvanoyi energetyky 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://sae.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii>

3. *Renewables steadily increasing in heating and cooling*. Eurostat, 2022.

<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/edn-20220211-1>

4. *Geletukha G., Zheliezna T.* Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050 // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021, v. 22 (5), p. 73-81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>

5. *Zvit z ocinki vidpovidnosti (dostatnosti) generuyuchih potuzhnostej dlya pokrittya prognozovanogo popitu na elektrichnu energiyu ta zabezpechennya neobhidnogo rezervu u 2020 roci*. [Report on the assessment of the adequacy of generating capacity to cover the projected demand for electricity and provide the necessary reserve in 2020.]. NEC Ukrenenergo, 2021. (Ukr.)

<https://ua.energy/zagalni-novyny/nkrekp-zatverdyla-zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-generatsiyi-u-2020-rotsi/>

6. *Biomethane zoning* and assessment of the possibility and conditions for connecting of biomethane producers to the gas transmission and distribution systems of Ukraine. Final Report for EBRD, 2021.

<https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/BM-Zoning-Final-Report-version-2022-02-01.pdf>

7. *Ilona Sologub*. Spozhivannya gazu v Ukrayini ta jogo cina. [Gas consumption in Ukraine and its price.]. VoxUkraine, 18.02.2022. (Ukr.)

<https://voxukraine.org/spozhyvannya-gazu-v-ukrayini-ta-jogo-tsina/>

8. *Statistichnij shorichnik* Ukrayini za 2020 rik. [Statistical Yearbook of Ukraine for 2020.]. State Statistics Service of Ukraine, 2021. (Ukr.)

http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Yearbook_2020.pdf

9. *Prodovzhennya terminiv ekspluatsiyi energoblokiv ukrayinskih AES*. [Extension of service life of Ukrainian NPP power units.]. Ministry of Energy of Ukraine. (Ukr.) http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=244916068

10. *Pro organizaciyu vikonannya Kompleksnoyi programi robit shodo prodovzhennya stroku ekspluatsiyi diyuchih energoblokiv atomnih elektrostancij*. [About the organization of performance of the Complex program of

works concerning prolongation of service life of operating power units of nuclear power plants.]. Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine № 340 on June 21, 2004. (Ukr.)

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0340558-04#Text>

11. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*. IEA, 03.03.2022.

<https://bit.ly/38LZhQ0>

12. *Pravila nadannya poslug z centralizovanogo opalennya, postachannya holodnoyi ta garyachoyi vodi i vodovidvedennya*. [Rules for the provision of services for central heating, hot and cold water supply and drainage.]. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 630 on July 21, 2005 (as amended). (Ukr.)

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/630-2005-%D0%BF#Text>

13. *Zberigayemo energiyu zadlya vashoyi bezpeki*. [Saving energy for your safety.]. Brochure of the Gas Storage Operator of Ukraine, 2021. (Ukr.) <https://bit.ly/3EqjpmB>

14. *Georgii Geletukha*. Potencial, suchasnij stan ta perspektivi vprovadzhennya bioenergetichnih proyektiv v Ukrayini. [Potential, current state and prospects of implementation of bioenergy projects in Ukraine.]. Presentation at the webinar "Renewable energy sources for decarbonization: bioenergy", 26.02.2021. (Ukr.) <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/eu4usociety-geletukha-bioenergy.pdf>

15. *Georgii G., Zheliezna T., Bashtovyi A.* Perspektivi dekarbonizaciyi centralizovanogo teplopostachannya Ukrayini [Prospects for decarbonization of district heating in Ukraine]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – Vol. 43, No. 3 (2021). – P. 44-51. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.6>

Отримано 20.04.2022

Received 20.04.2022

АНАЛІЗ УСПІШНИХ ПРИКЛАДІВ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ З АГРОБІОМАСИ В ЄВРОПІ

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

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.5>

Представлено поточний стан розвитку біоенергетики в ЄС. Проаналізовано успішні приклади реалізованих проєктів з виробництва теплової енергії з агробіомаси в ЄС та Україні. Визначено пріоритетні напрямки розвитку біоенергетичного сектору України.

The current state of bioenergy development in the EU is presented. Successful examples of implemented projects on heat production from agrobiomass in the EU and Ukraine are analyzed. Priority directions for the development of bioenergy sector of Ukraine are determined.

Бібл. 15, табл. 3, рис. 1.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, біоенергетика, біопаливо, біомаса, агробіомаса, сільськогосподарські залишки.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ОЕЗ – олійноекстракційний завод;
ТЕЦ – теплоелектроцентрально;
ТЕС – тепла електростанція;
ЦТ – централізоване теплопостачання;

с/г – сільське господарство;
с.р. – суха речовина;
н.е. – нафтовий еквівалент.

Нижній індекс:

т – тепловий;
е – електричний.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю реалізації «зеленого» енергетичного переходу. Значний внесок в цей процес може зробити біоенергетика, в першу чергу, за рахунок залучення невикористаного потенціалу біомаси сільськогосподарського походження. **Метою** роботи є аналіз перспектив розвитку виробництва теплової енергії з агробіомаси в ЄС та Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення літературних, статистичних та інших даних.

Стан розвитку біоенергетики в ЄС

Внесок біоенергетики до валового кінцевого споживання енергії в ЄС-28 складає більше 10%, що становить майже 60% загального внеску всіх ВДЕ. Щодо структури споживання біомаси, майже 70% загального обсягу – це деревна біомаса, 20% припадає на агробіомасу (сільськогосподарські залишки і енергетичні рослини) [1, 2]. Більше половини всього обсягу біомаси використовується для виробництва теплової енергії (табл. 1); очікується, що така тенденція збережеться і надалі. Наразі біоенергетика забезпечує більше 80% всієї теплової енергії з ВДЕ. Експерти Європейської платформи з відновлюваного тепла і холоду прогнозу-

ють, що у 2040 р. цей показник складатиме, за різними сценаріями розвитку, від 30% до 60% [3, 4].

Нарощування обсягів виробництва енергії з біомаси в ЄС можливе, в першу чергу, за рахунок більш широкого залучення агробіомаси до енергетичного сектору. За поточної практики збирання сільськогосподарських залишок в ЄС, їх потенціал, доступний для енергетики, становить більше 102 млн т (с.р.)/рік. При заготівлі оптимального обсягу залишок цей потенціал може зрости до 146 млн т (с.р.)/рік (рис. 1). За оцінками Спільного центру досліджень Єврокомісії, зазначений потенціал (еквівалентний близько 56 млн т н.е./рік) може повністю використовуватися для енергетичних потреб без негативного впливу на вміст вуглецю в ґрунті [5].

Огляд успішних прикладів впровадження систем опалення на агробіомасі в ЄС

Розвитку напрямку енергетичного використання агробіомаси присвячений проєкт «Сприяння впровадженню систем опалення на агробіомасі в сільських регіонах Європи – AgroBioHeat» (2019-2022 рр.), що реалізується в рамках Програми ЄС Горизонт 2020 [6]. Консорціум проєкту включає 13 провідних в секторі біоенергетики організацій з 9 країн Європи, у тому числі

з України. Від України у виконанні проєкту бере участь Біоенергетична асоціація України. Виконавцями детально розглянуто низку реалізованих проєктів з виробництва теплової енергії з різних видів агробіомаси для систем опалення в Європі, проаналізовано фактори їх успіху. Вибраний перелік таких проєктів представлено в табл. 2 з описом найбільш цікавих з них нижче. Системи опалення на агробіомасі мають численні сфери застосування – централізоване тепlopостачання, опалення теплиць, сільськогосподарських підприємств, агропромислових компаній, муніципальних будинків, готелів та ін. Найбільш використовуваними видами агробіомаси є солом зернових, лушпиння соняшника, енергетичні рослини (міскантус, верба).

Данія є відомим європейським лідером з енергетичного використання соломи. Річне утворення соломи в країні становить, в середньому, 5,5 млн т, з яких до 1,6 млн т споживається для потреб енергетики. Це забезпечує близько 2% кінцевого споживання енергії та 10% загального виробництва енергії з відновлюваних джерел. Більше третини всього обсягу соломи використовується на 55 котельнях ЦТ потужністю 0,4...11 МВт. Невеликі ТЕЦ та потужні ТЕЦ споживають близько 19% і 20% загальної кількості соломи, відповідно. Решта застосовується як паливо у більш ніж 7000 котлах фермерського типу (до 1 МВт) та в побутових котлах [8-10].

Цікавим прикладом опалення на соломі є система ЦТ данського селища Ульб'єрг. Котел REKA (Данія)

Табл. 1. Динаміка виробництва енергії з біомаси в ЄС, тис. т н.е. [3]

Сектор	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2017 р.	2020 р. (прогноз)
Виробництво електроенергії, у т.ч.:	6000	10669	15353	15985	20052
тверда біомаса	4743	7476	9609	10041	13462
біогаз	1105	2766	5270	5515	5497
рідкі біопалива	152	428	474	429	1096
Виробництво тепла, у т.ч.:	62612	80805	84181	88585	90411
тверда біомаса	61700	78595	80810	84431	80887
біогаз	743	1578	3124	3909	4526
рідкі біопалива	168	631	240	237	4998
Виробництво рідких біопалив, у т.ч.:	3277	13184	13093	15192	29054
біоетанол	594	2809	2535	2859	7324
біодизель	2683	10347	10425	12174	20983
Всього, тис. т н.е.	71889	104658	112628	119763	139516

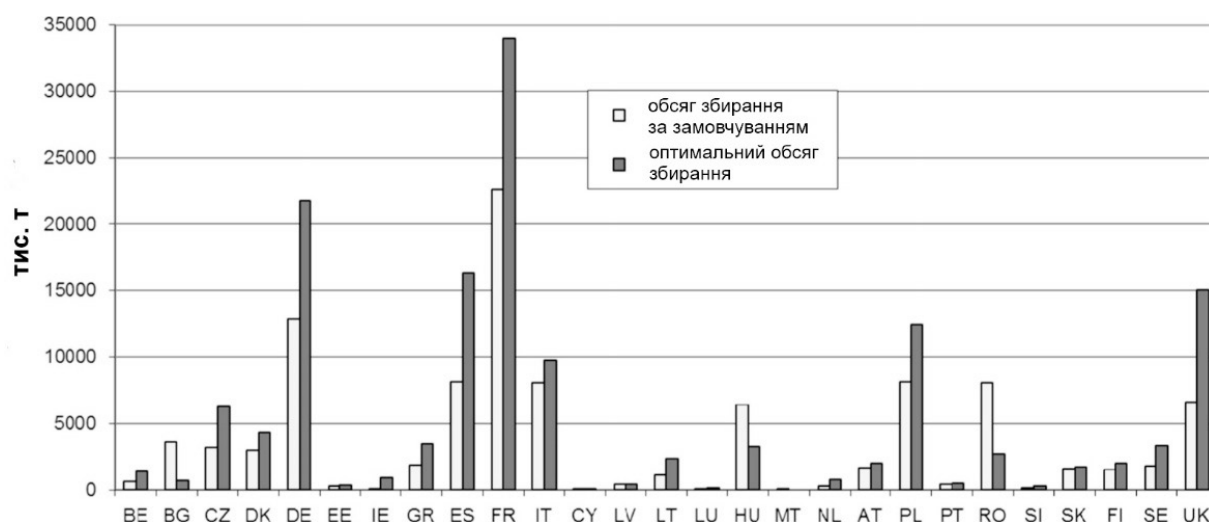


Рис. 1. Потенціал сільськогосподарських залишків, доступних для виробництва енергії в ЄС-27, тис. т (с.р.) [5]

Табл. 2. Вибрані приклади існуючих систем опалення на агробіомасі в країнах Європи* [7]

Сфера застосування	Місце знаходження	Вид біомаси	Потужність котла, виробник
Система ЦТ (2016 р.)	Данія, с. Ульб'єрг	солома зернових (тюки)	1 МВт, REKA (Данія)
Система ЦТ	Данія, м. Рудкьобінг	солома зернових (тюки)	7,7 МВт, Justsen (Данія)
Система ЦТ	Данія, с. Бовлструп	солома зернових (тюки)	2 МВт, Linka (Данія)
Система ЦТ	Данія, м. Гольбек	солома зернових (тюки)	4,5 МВт, Linka (Данія)
Система ЦТ	Чехія, м. Остров	солома зернових (тюки)	1 МВт, TTS (Чехія)
Система ЦТ	Словаччина, м. Детва	солома зернових (тюки), деревна тріска	3 МВт, 6 МВт, TTS (Чехія)
Система ЦТ	Польща, м. Любань	солома зернових	1 МВт, 2×3,5 МВт
Система ЦТ	Іспанія, м. Вілафранка-дель-Пенедес	обрізки виноградної лози	500 кВт, Heizomat (Німеччина)
Система ЦТ	Франція, муніципалітет Анже-сюр-Сомм	міскантус	100 кВт, Heizomat (Німеччина)
Система ЦТ	Франція, муніципалітет Шатоден	міскантус	3 МВт, Compte-R (Франція)
Система ЦТ (2019 р.)	Австрія, с. Штарнворс	солома зернових	1 МВт, Polytechnik (Австрія) 3 МВт, Agro Forst (Австрія)
Система ЦТ (2013 р.)	Австрія, м. Перзенбойг	міскантус (брикети)	2×200 кВт, ETA (Австрія)
Система ЦТ (2011 р.)	Австрія, м. Петценкірхен	міскантус (тріска)	400 кВт, Binder (Австрія) 200 кВт, ETA (Австрія)
Система ЦТ	Австрія, м. Хофамт-Приль	міскантус (тріска)	350 кВт, Schmid (Швейцарія)
Система ЦТ (2016 р.)	Румунія, с. Естелнік	енергетична верба	150 кВт, BioSistem (Румунія)
Опалення с/г підприємства	Данія, с. Холмгард	солома зернових (тюки)	950 кВт, Linka (Данія)
Опалення с/г підприємства	Данія, с. Норре-Алслев	солома зернових (тюки)	800 кВт, Linka (Данія)
Опалення с/г підприємства	Швеція, с. Енгельгольм	солома, деревна тріска	1 МВт, Linka (Данія)
Опалення с/г підприємства	Великобританія, м. Боремвуд	солома зернових	995 кВт, Justsen (Данія)
Опалення с/г підприємства	Румунія, м. Тирговіште	лушпиння соняшника, солома	150 кВт, BioSistem (Румунія)
Опалення теплиці (2015 р.)	Румунія, с. Валя-Крішулуй	енергетична верба (тріска)	4×750 кВт, 2×350 кВт, BioSistem (Румунія)
Опалення теплиці (2012 р.)	Греція, м. Кліді	гранули з лушпиння соняшника	8×1,16 МВт, N. Samaras (Греція)
Опалення теплиці	Греція, м. Аргос	гранули з лушпиння соняшника	3×350 кВт, PelleTech / Camino Design (Греція)

Опалення готелю (2014 р.)	Греція, м. Карпенісіон	гранули з лушпиння соняшника	200 кВт, PelleTech / Camino Design (Греція)
Опалення готелю (2018 р.)	Іспанія, муніципалітет Мурільйо-де-Гальєго	солома зернових (тюки)	250 кВт, ACR ECOCALDERAS (Іспанія)

* Більше прикладів можна знайти в обсерваторії проєкту AgroBioHeat [6].

потужністю 1 МВт на тюках соломи було встановлено у 2016 р. з метою заміщення природного газу в існуючій системі ЦТ, до якої підключено 187 споживачів. При інвестиційних витратах проєкту порядку 1 млн євро, річні заощадження на паливі склали близько 128 тис. євро, а скорочення плати за опалення досягало 50% порівняно з використанням природного газу. Котел має повністю автоматизовану систему подачі біопалива і оснащений електростатичним фільтром, який забезпечує видалення до 98% твердих частинок з димових газів. Споживається близько 100 т соломи на рік, яку на котельню постачають місцеві фермери. Котел може працювати на інших видах сільськогосподарських залишків, а також на деревній трісці вологістю до 30%.

Потужніша система ЦТ на солі впроваджена у місті Рудкьобінг, де експлуатується котел Justsen (Данія) 7,7 МВт з водоохолоджувальною рухомою решіткою. Установку обладнано рукавним фільтром, а для денітрифікації димових газів застосовано метод вибіркової некаталітичної редукції із уприскуванням сечовини. Інвестиційні витрати проєкту склали порядку 3,3 млн євро. Інші приклади систем ЦТ на солі в Данії включають використання котлів Linka (Данія) потужністю 2,0...6,5 МВт. За даними виробника, при експлуатації котлів досягається рівень емісії пилу набагато нижче граничнодопустимого значення Директиви ЄС для спалювальних установок середньої потужності (40 мг/нм³); емісія СО також забезпечується нижче граничнодопустимого значення (625 мг/нм³) [7].

Успішні приклади енергетичного використання соломи можна знайти і в інших країнах Європи. Так, в Іспанії (муніципалітет Мурільйо-де-Гальєго) котел потужністю 250 кВт забезпечує тепловою енергією готельний комплекс, розташований у гірській місцевості. Котел на тюках соломи, обладнаний циклоном для очищення димових газів від твердих частинок, встановлено у 2018 р. з метою заміщення використання пропану. Споживання біомаси становить 280 т/рік, солома постачається з місцевих полів, які належать власнику котельного комплексу. При інвестиційних витратах 90 тис. євро і заощадженнях на паливі 45...50 тис. євро/рік, проєкт мав дуже короткий термін окупності.

У місті Вілафранка-дель-Пенедес (Іспанія) у котельні комунальної теплової мережі встановлено котел Heizomat (Німеччина) потужністю 500 кВт, що використовує виключно обрізки виноградарів для виробництва теплової енергії для громадських будівель. Постачання біомаси до котельні здійснює виноробний кооператив, який, серед інших послуг, пропонує своїм асоційованим членам (фермерам) збір обрізків виноградарів з меншими витратами у порівнянні з їх самостійним збором фермерами. Виноробний регіон Пенедес має значний потенціал даного виду біомаси із річним виходом 600...800 кг обрізків з гектару виноградарів. Наразі для потреби котельні комунальної теплової мережі необхідно щорічно збирати біомасу з 400 га, але у подальшому існують плани продовжити встановлення котлів на обрізках та збільшити площу їх заготівлі [6].

Незважаючи на широке використання деревної біомаси, доволі багато котлів на солі впроваджено в Швеції, особливо в її самому південному регіоні Сконе. В країні працюють, принаймні, чотири котельні ЦТ загальною потужністю 12 МВт, порядку 40 котелів потужністю більше 500 кВт кожна і близько 100 котлів з середньою потужністю 500 кВт [7]. Приклади систем ЦТ на солі також мають місце в Австрії, Чехії, Польщі, Словаччині (див. табл. 2).

В Греції основними видами агробіомаси, що використовуються для отримання енергії, є оливкова макуха та лушпиння соняшника. Макуха у великій кількості утворюється на підприємствах з виробництва оливкової олії, і більша її частина споживається на місці для отримання теплової енергії на технологічні потреби. Решта по невеликій ціні продається іншим споживачам, у тому числі населенню. Основний обсяг гранул з лушпиння соняшника імпортується по доступній ціні, що робить їх конкурентоздатним паливом в країні.

Найбільш відомим прикладом успішного виробництва теплової енергії з агробіомаси в Греції є проєкт, реалізований компанією AGRIS S.A. (м. Кліді). У 2019р. цей проєкт був детально вивчений і включений Єврокомісією до переліку прикладів конкурентоздатного використання ВДЕ [11]. У 2012 р. компанія AGRIS S.A. встановила вісім котлів на біомасі загальною

потужністю 9,3 МВт для опалення теплиці-розсадника площею більше трьох гектарів і заміщення використання мазуту. Спочатку котли працювали на оливковій макусі, але пізніше стали застосовуватися гранули з лушпиння соняшника через їх кращі паливні характеристики і відсутність проблем із запахом. Котли на біомасі забезпечують до 97% загальної потреби у тепловій енергії, а у пікових режимах працює також старий мазутний котел. Гранули з лушпиння соняшника імпортуються з Болгарії і мають наступні типові характеристики: нижча теплота згорання 16,3 МДж/кг, вологість 10%, зольність 4,1% (с.р.), механічна міцність 95%. Річне споживання гранул становить близько 3,6 тис. т в залежності від погодних умов. Інвестиції в проєкт склали близько 1 млн євро, з яких 30% було забезпечено європейським та національним інвестиційними фондами. Перехід з мазуту на біопаливо дав можливість заощаджувати на опаленні теплиці 20-30% річних коштів.

Компанія BOKARPOS S.A. (м. Аргос) також опалює теплицю гранулами з лушпиння соняшника за допомогою трьох сучасних котлів з рухомою решіткою потужністю 350 кВт кожний. В подальшому компанія планує встановити додаткове опалювальне обладнання і розпочати використання також власної біомаси – відходів з теплиці та подрібнених обрізків багаторічних сільськогосподарських насаджень. Гранули з лушпиння соняшника застосовуються в системі опалення готелю, розташованого у гірській місцевості Греції з прохолодним кліматом (м. Карпенісіон). Котел потужністю 200 кВт, встановлений у 2014 р., працює протягом майже всього року із споживанням 75 т біопалива на рік. Термін окупності інвестицій проєкту (~23 тис. євро) склав менше півтора року.

У Франції є чимало прикладів виробництва теплової енергії з міскантусу. Один з них – система опалення муніципального будинку для людей похилого віку у містечку Шеврез. Котел Heizomat (Німеччина) потужністю 400 кВт було встановлено у 2018 р. Міскантус постачається місцевими фермерами. Реалізації проєкту сприяла місцева адміністрація. Міскантус використовується в системах ЦТ муніципалітетів Анже-сюр-Сомм (котел 100 кВт) і Шатоден (3 МВт), а також для опалення інших об'єктів. Кілька систем ЦТ на біомасі міскантусу працюють в Австрії. В Румунії є успішні приклади виробництва тепла з енергетичної верби для системи ЦТ і для опалення теплиці.

У майбутньому розвиток систем опалення може бути пов'язаний з використанням комбінації різних технологій, які дозволять гнучке регулювання вико-

ристання енергоносіїв з метою оптимізації витрат чи інших критеріїв. Прикладом такої системи може бути сучасна комплексна система централізованого теплопостачання Ringsted Forsyning данського міста Рінгстед. В цій системі ЦТ об'єднані котельня із двома котлами на тюках соломи потужністю 17 МВт, три теплових насоси загальною потужністю 10 МВт, які переважно використовують електричну енергію із розташованих поруч вітроелектростанцій та ТЕЦ на природному газі і біометані потужністю 11 МВт та 13 МВт. Завдяки комплексному підходу, енергетична генерація компанії Ringsted оптимізована під потреби споживачів та наявність ресурсів ВДЕ. Незважаючи на суттєве зростання індексу споживчих цін у Данії, застосування інновацій дає можливість останні 12 років залишати стабільну вартість послуг теплопостачання. У 2021 році на котельні встановлено скруббер для очищення димових газів, що забезпечує видалення 97% SO_2 . Також встановлено тепловий насос, який відбирає теплову енергію з димових газів, що забезпечило збільшення ККД теплової генерації з 93 до 103%.

Ситуація в Україні

В Україні енергетичний потенціал відходів та побічної продукції сільського господарства (солома зернових, стебла кукурудзи, стебла соняшника, лушпиння соняшника та ін.) становить 9-11 млн т н.е./рік залежно від врожайності сільськогосподарських культур. Другою складовою потенціалу агробіомаси є енергетичні рослини (верба, тополя, міскантус та ін.) – близько 7,5 млн т н.е./рік за умови вирощування на 2 млн га незадіяних сільськогосподарських земель.

Хоча частка агробіомаси в загальному енергетичному потенціалі біомаси України становить 75...80%, її практичне використання (крім лушпиння соняшника) залишається вкрай недостатнім для досягнення національних цілей в сферах енергетики та клімату. При цьому доволі обмежений енергетичний потенціал деревної біомаси (2,6-3 млн т н.е./рік) реалізується майже повністю. Очевидно, що треба суттєво міняти структуру використання потенціалу біомаси в Україні, надаючи перевагу сільськогосподарським залишкам і енергетичним рослинам. Це відповідає тенденціям, закладеним в Європейський зелений курс і поглядам вітчизняних експертів на майбутнє біоенергетики [12-14].

В Україні активно використовується лушпиння соняшника для виробництва біопалив та енергії. Практично всі олійноекстракційні заводи оснащені котлами для спалювання лушпиння, експлуатуються кілька ТЕЦ і ТЕС (табл. 3). Одним з останніх прикладів є ТЕС «Аякс-Дніпро»

15 МВт_е – найпотужніша ТЕС на біомасі в Україні, запущена влітку 2020 р. біля ОЕЗ «Потоки» (перша черга). ТЕС обладнана двома котлами по 35 т пари/год (виробництво підприємства «Котлоенергопроект», Харків) і турбогенератором Siemens 16 МВт_е. Як основне паливо застосовується лушпиння і гранули з лушпиння соняшника. Котли можуть працювати на інших видах біомаси – деревній трісці, відходах та побічній продукції вирощування соняшника [15].

Щодо виробництва енергії з соломи, в Україні впроваджено кілька сотень котлів та теплогенераторів потужністю до 1 МВт; головним чином, вони працюють на сільськогосподарських підприємствах, об'єктах соціальної сфери у сільській місцевості, зерносушильних комплексах. Цікавим прикладом успішної експлуатації крупної установки на тюкованій соломі є котельня потужністю 10 МВт на птахокомплексі «Дніпровський». В котельні з

Табл. 3. ТЕЦ і ТЕС на біомасі в Україні [15]

Назва об'єкту	Розташування	Вид палива	Потужність, МВт _е
ПРАТ «КРОПИВНИЦЬКИЙ ОЕЗ», ТЕЦ	м. Кропивницький, Кіровоградська обл.	лушпиння	12,3 (33 МВтт)
ТОВ «Смілаенергопромтранс», ТЕЦ	м. Сміла, Черкаська обл.	деревна тріска	8,5 (10 МВтт)
ТОВ «Комбінат Каргілл», ТЕЦ	м. Донецьк	лушпиння	2,0 (15 МВтт)
ТОВ «БІОГАЗЕНЕРГО», ТЕС (2013 р.)	смт Іванків, Київська обл.	деревна тріска	19,0
ТОВ «АПК «Євгройл», ТЕЦ	м. Миколаїв	лушпиння	5,0 (10 МВтт)
ТОВ «Кліар Енерджі», Корюківська ТЕС (2016 р.)	м. Корюківка, Чернігівська обл.	деревна тріска	4,0
ТОВ «Сінга Енерджіс», ТЕЦ	м. Березанка, Миколаївська обл.	деревна тріска	5,1
ФОП Пересадько Р.В., електростанція	с. Королівка, Івано-Франківська обл.	деревна тріска	0,1
ТОВ ЕПГ «Югенергопромтранс», ТЕС (2018 р.)	м. Переяслав-Хмельницький, Київська обл.	деревна тріска	5,0
ТзОВ «Мебель-сервіс», ТЕЦ	с. Полове, Львівська обл.	деревна тріска	2,4
ТОВ «Біо-ТЕС», ТЕС (2020 р.)	м. Рахів, Закарпатська обл.	деревна тріска	6,0
КП «Міськтепловоденергія», ТЕЦ	м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл.	деревна тріска	1,6
ТОВ «АЯКС ДНІПРО», перша черга ТЕС (2020 р.)	м. Дніпро	лушпиння	16,0
ТОВ «ЕЙДЖІЕЛ ЕНЕРДЖІ», ТЕС (2020 р.)	смт Нова Водолага, Харківська обл.	лушпиння	7,0
ТОВ «Поліська ТЕС» (2021 р.)	м. Овруч, Житомирська обл.,	деревна тріска	5,9
ФОП «Стельмахук В. Д.», мініелектростанція силова	смт Делятин, Івано-Франківська обл.	деревна тріска	0,05
ТОВ «ПГС-Енергія», ТЕС (2020 р.)	м. Запоріжжя	лушпиння	2,7
ТОВ «БІО ЕЛЕКТРИКС», ТЕС (2020 р.)	с. Клубівка, Хмельницька обл.	деревна тріска, гранули з лушпиння, тріска зі стебел кукурудзи	6,0

2012 р. працюють два котли TTS Group (Чехія) по 5 МВт. Солома постачається з власних полів підприємства, середній радіус поставки – 15 км. Приклади енергетичного використання інших видів агробіомаси (стебла кукурудзи та соняшника, енергетичні рослини та ін.) є доволі обмеженими або взагалі відсутні, що свідчить про недостатній рівень розвитку цього напрямку в країні.

Висновки та рекомендації

Виробництво теплової енергії з агробіомаси має значні перспективи розвитку в країнах ЄС і в Україні, що пов'язано з великим потенціалом цього енергетичного ресурсу і поки низьким рівнем його практичного застосування. Для подальшого розвитку сектору біоенергетики потрібно суттєво міняти структуру використання вітчизняного потенціалу біомаси, надаючи перевагу сільськогосподарським залишкам і енергетичним рослинам, що відповідає Європейському зеленому курсу і поглядам експертів. Враховуючі наявний невикористаний потенціал різних видів сільськогосподарських залишків і регіональні особливості рослинництва, важливо налагодити надійну технологію заготівлі і енергетичної конверсії відходів та побічної продукції виробництва кукурудзи на зерно і соняшника.

Для України найбільш перспективними напрямками видаються впровадження сучасних котлів і ТЕЦ на аграрній біомасі, виробництво рідких біопалив першого і другого покоління, а також біометану з біомаси сталого походження. Також рекомендується встановлювати котли на біомасі у котельні систем централізованого тепlopостачання, створюючи комплексні системи, які поєднують різні технології виробництва теплової енергії. Така диверсифікація енергоносіїв дозволить мінімізувати вартість теплової енергії для споживачів, забезпечуючи економічно доцільну діяльність теплової генерації.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bioenergy in Europe*. ETIP Bioenergy, 2020. https://etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_Bioenergy%20in%20Europe_rev_feb2020.pdf
2. *Biomass Supply*. Bioenergy Europe Statistical Report, 2020. <https://bioenergyeurope.org/article/270-biomass-supply.html>
3. M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard et al. Biomass for energy in the EU – The support framework // *Energy Policy*. – 2019, v. 131, August, p. 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>
4. *Strategic Research and Innovation Agenda for Climate-Neutral Heating and Cooling in Europe*, RHC-ETIP, 2020. <https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2020/10/RHC-ETIP-SRIA-2020-WEB.pdf>
5. F. Monforti et al. Optimal energy use of agricultural crop residues preserving soil organic carbon stocks in Europe // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015, v. 44, April, p. 519-529. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.033>
6. *AgroBioHeat* – Promoting the penetration of agrobiomass heating solutions in European rural areas. <https://agrobioheat.eu/>
7. M. Karampinis et al. D3.1 Report on identified cases. AgroBioHeat, 2020. https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D3.1_agrobiomass-heating-facilities_v1.0-1.pdf
8. *Straw to Energy*. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition. Food & Bio Cluster Denmark, 2020. https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/11/AgroBioHeat_D7.6_Straw_to_energy_EN.pdf
9. *Biomass Statistics: Straw*. Danish Energy Agency, 2018. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/metode_halm.pdf
10. M. Gawor, S. Majer, D. Thrän. Impact of promotion mechanisms for advanced and low-ilUC biofuels on markets: Straw for bioenergy. IEA Bioenergy Task 40, 2014. <https://task40.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/t40-low-iluc-straw-august-2014.pdf>
11. J. Jansen, C. Stroia. Competitiveness of corporate sourcing of renewable energy. Case study: AGRIS S.A. European Commission, 2019. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3c4cd582-c48a-11e9-9d01-01aa75ed71a1>
12. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баишовий А.І. Потенціал та перспективи енергетичного використання агробіомаси в Україні // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2020, т. 42, № 1, с. 42-51. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.5>
13. Желєзна Т.А. Європейський «зелений» курс і нові можливості для розвитку відновлюваної енергетики // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2021, т. 43, № 1, с. 75-81. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>
14. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Баишовий 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>
15. Желєзна Т.А. Агробіомаса як найбільша складова енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Презентація на семінарі «Відновлювані джерела енергії для декарбонізації: біоенергетика», Київ, 26.02.2021. <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/eu4usociety-zheliezna-bioenergy.pdf>

ANALYSIS OF SUCCESSFUL CASES OF HEAT PRODUCTION FROM AGROBIOMASS IN EUROPE

Zheliezna T.A., Drahniiev S.V., Bashtovyi A.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.2.2022.5>

The aim of the work is to analyze prospects for the development of heat production from agrobiomass in the EU and Ukraine. Attracting the untapped potential of agricultural residues and energy crops to the fuel and energy balance of European countries can be an effective measure to accelerate the implementation of green energy transition. The contribution of bioenergy to the gross final energy consumption in the EU-28 exceeds 10%, which is almost 60% of the total contribution of all renewable energy sources. More than half of the total biomass is used for heat production and this trend is expected to continue. A number of implemented projects for the production of heat from different types of agrobiomass for heating systems in Europe are considered, the factors of their success are analyzed. Agrobiomass heating systems have numerous areas of application such as district heating, heat supply to greenhouses, agricultural enterprises, agro-industrial companies, municipal buildings, hotels and others. The most used types of agrobiomass are cereal straw, sunflower husk, energy crops (miscanthus, willow). In Ukraine, the share of agrobiomass in the total potential of biomass for energy is 75... 80%, however, its practical usage (except for sunflower husk) remains extremely insufficient to achieve national goals in the energy and climate spheres. For the bioenergy sector of Ukraine, the most promising areas seem to be the introduction of modern boilers and CHP plants on agricultural biomass, the production of liquid biofuels of the first and second generations, as well as production of biomethane from biomass of sustainable origin. At that preference should be given to the utilization of grain maize and sunflower residues.

References 15, table 3, figures 1.

Keywords: renewable energy sources, bioenergy, biofuels, biomass, agrobiomass, agricultural residues.

1. *Bioenergy in Europe*. ETIP Bioenergy, 2020.
https://etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_Bioenergy%20in%20Europe_rev_feb2020.pdf
2. *Biomass Supply*. Bioenergy Europe Statistical Report, 2020.
<https://bioenergyeurope.org/article/270-biomass-supply.html>

3. M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard et al. Biomass for energy in the EU – The support framework // *Energy Policy*. – 2019, v. 131, August, p. 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>

4. *Strategic Research and Innovation Agenda for Climate-Neutral Heating and Cooling in Europe*, RHC-ETIP, 2020.

<https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2020/10/RHC-ETIP-SRIA-2020-WEB.pdf>

5. F. Monforti et al. Optimal energy use of agricultural crop residues preserving soil organic carbon stocks in Europe // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015, v. 44, April, p. 519-529.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.033>

6. *AgroBioHeat* – Promoting the penetration of agrobiomass heating solutions in European rural areas.

<https://agrobioheat.eu/>

7. M. Karampinis et al. D3.1 Report on identified cases. *AgroBioHeat*, 2020.

https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D3.1_agrobiomass-heating-facilities_v1.0-1.pdf

8. *Straw to Energy*. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition. Food & Bio Cluster Denmark, 2020. https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/11/AgroBioHeat_D7.6_Straw_to_energy_EN.pdf

9. *Biomass Statistics: Straw*. Danish Energy Agency, 2018

https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/metode_halm.pdf

10. M. Gawor, S. Majer, D. Thrän. Impact of promotion mechanisms for advanced and low-iLUC biofuels on markets: Straw for bioenergy. IEA Bioenergy Task 40, 2014.

<https://task40.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/t40-low-iluc-straw-august-2014.pdf>

11. J. Jansen, C. Stroia. Competitiveness of corporate sourcing of renewable energy. Case study: AGRIS S.A. European Commission, 2019.

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3c4cd582-c48a-11e9-9d01-01aa75ed71a1>

12. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahniiev S.V., Bashtovyi A.I. Potentsial ta perspektyvy enerhetychnoho vykorystannya ahrobiomasy v Ukrayini [Potential and prospects for using agribiomass for energy in Ukraine]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – Vol. 42, No. 1 (2020). – P. 42-51. (Ukr.)

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.5>

13. Zheliezna T. Yevropeiskyi «zelenyi» kurs i novi mozhlyvosti dlia rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky [European Green Deal and new opportunities for the development of renewable energy]. *Thermophysics and*

Thermal Power Engineering. – Vol. 43, No. 1 (2021). – P. 75-81. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>

14. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.* Dorozhnya karta rozvytku bioenerhetyky Ukrainy do 2050 roku [Roadmap for 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>

15. *Zheliezna T.A.* Ahrobiomasa yak naybilsha skladova enerhetychnoho potentsialu biomasy v Ukraini [Agrobiomass as the largest component of biomass energy potential in Ukraine]. Presentation at the seminar «Renewable energy sources for decarbonization: bioenergy», Kyiv, 26.02.2021. (Ukr.)

<https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/eu4usociety-zheliezna-bioenergy.pdf>

Отримано 10.02.2022

Received 10.02.2022

УДК 620.92

ДОСВІД КРАЇН ЄС З РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА СКОРОЧЕННЯ СПОЖИВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Гелетуха Г.Г., докт. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Драгнєв С.В., 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.2.2022.6>

Розглянуто пропозиції Міжнародного енергетичного агентства і Європейської Комісії щодо заходів, впровадження яких може призвести до відмови Європи від російського природного газу. Представлено кращі приклади країн ЄС по скороченню споживання викопних палив, розвитку відновлюваної енергетики та підвищенню енергоефективності.

Proposals of the International Energy Agency and the European Commission on measures that may lead to Europe's rejection of Russian natural gas are considered. The best examples of EU countries in reducing fossil fuel consumption, developing renewable energy and improving energy efficiency are presented.

Бібл. 15, рис. 4.

Ключові слова: відновлювана енергетика, відновлювані джерела енергії, декарбонізація, біоенергетика, біомаса, енергоефективність.

АЕС – атомна електростанція;

БП – біопаливо;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;

МЕА – Міжнародне енергетичне агентство;

ПГ – природний газ;

СПГ – скраплений природний газ;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ЦТ – централізоване тепlopостачання;

SEK – шведська крона;

н.е. – нафтовий еквівалент.

Вступ

Протягом останніх місяців до початку війни Росії проти України спостерігався значний ріст і коливання цін на природний газ в Європі. Після періоду певної стабілізації стався різкий сплеск ціни із піком до 2300 євро/1000 м³ у першій половині березня 2022 р. (дані газового хабу ТТФ). До середини квітня 2022 р. ціна газу знизилася до 1000...1100 євро/1000 м³, але об'єктивних підстав для її подальшого зменшення немає. Нагальною задачею для Європейського Союзу і для України є повна відмова від російського природного газу. Ймовірно, що і після переходу до інших можливих постачальників (наприклад, СПГ з Катару або США), ціни не будуть знижуватися через зменшення пропозиції російського газу на ринку і ріст конкуренції за цей енергоносіє. Серед першочергових заходів для заміщення російського природного газу більшістю експертів називаються широко-масштабний розвиток відновлюваних джерел енергії та впровадження енергоефективних заходів. Важливо зазначити, що за поточних цін на газ, біометан і всі види твердої біомаси з економічної точки зору стають повністю конкурентоздатними з природним газом [1, 2].

Метою роботи є аналіз досвіду країн ЄС по скороченню споживання природного газу та інших викопних палив, розвитку відновлюваних джерел енергії і підвищенню енергоефективності для визначення найбільш ефективних заходів для впровадження в Україні. **Методи дослідження** включають вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Заходи для відмови Європейського Союзу від російського природного газу

На початку березня 2022 р. Міжнародне енергетичне агентство представило низку пропозицій щодо конкретних кроків, які може реалізувати ЄС для скорочення імпорту російського природного газу більш ніж на третину вже до кінця 2022 р. [3]. Ці заходи корелюються з базовими положеннями Європейським Зеленим Курсу (European Green Deal), прийнятого ще наприкінці 2019 р. [4].

Запропоновані МЕА заходи передбачають наступні дії і очікувані результати:

- Не підписувати жодних нових контрактів на постачання газу з Росією. Результат: більша диверсифікація поставок у поточному та наступних роках.

- Замінити російські поставки газом від альтернативних постачальників. Результат: збільшення поставок неросійського газу приблизно на 30 млрд м³ протягом року.

- Запровадити мінімальні зобов'язання щодо зберігання газу. Результат: вища підготовленість газової системи до наступного опалювального сезону.

- Прискорити реалізацію нових вітрових та сонячних проєктів. Результат: скорочення споживання газу на 6 млрд м³ протягом року.

- Максимізувати виробництво електроенергії за рахунок біоенергетики та ядерної енергії. Результат: скорочення споживання газу на 13 млрд м³ протягом року.

- Запровадити короткострокові податкові заходи щодо незапланованого прибутку, щоб захистити вразливих споживачів електроенергії від різкого зростання цін. Результат: менші рахунки за електроенергію, навіть якщо ціни на газ залишаються високими.

- Прискорити заміну газових котлів на теплові насоси. Результат: скорочення споживання газу на 2 млрд м³ протягом року.

- Прискорити впровадження заходів з підвищення енергоефективності в будівлях і промисловості. Результат: скорочення споживання газу майже на 2 млрд м³ протягом року.

- Заохочення споживачів до тимчасового зниження температури термостата на 1°C. Результат: скорочення споживання газу приблизно на 10 млрд м³ протягом року.

- Активізувати зусилля з диверсифікації та декарбонізації джерел гнучкості енергосистеми. Результат: послаблення прямого зв'язку між постачанням газу та енергетичною безпекою в Європі.

Європейська Комісія у березні 2022 р. представила концепцію плану «Перезарядка ЄС» (REPowerEU) [5]. Мета цього плану – досягти повної незалежності Європи від викопних палив з Росії, починаючи з природного газу, задовго до 2030 року. План REPowerEU включає три напрямки діяльності: термінові дії по контролю цін на енергоносії, забезпечення поповнення сховищ газу на наступний опалювальний сезон, диверсифікація джерел енергопостачання. Запропоновані заходи, серед іншого, включають регулювання роздрібних цін на енергоносії; забезпечення заповнення підземних сховищ газу на території ЄС на рівні, щонайменше, 90% їх ємності до 1 жовтня кожного року; збільшення кількості встановлених дахових сонячних панелей, теплових насосів та реалізованих заходів з енергозбереження; декарбонізація промисловості шляхом прискореного впровадження електрифікації та використання відновлюваного водню;

розширення виробництва і споживання низьковуглецевих палив та інші заходи. Реалізація плану «Перезарядка ЄС» дасть можливість скоротити потребу в російському природному газі на дві третини вже до кінця 2022 року.

Огляд кращого досвіду країн ЄС по досягнутому заміщенню викопних палив відновлюваними джерелами енергії

Європейський Союз вже протягом багатьох років проводить комплексну та послідовну політику розвитку ВДЕ і скорочення споживання викопних палив. За даними 2020 р., частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії ЄС становить 22,1%, що на 2% вище запланованого на той рік. В окремих країнах цей показник набагато вище. Наприклад, у Швеції внесок ВДЕ до кінцевого енергоспоживання складає 60,1%, в Фінляндії – 43,8%, в Латвії – 42,2%, в Австрії – 36,5% [6]. Наразі країни ЄС прикладають значних зусиль для загальної декарбонізації економіки, суттєвою частиною чого є декарбонізація енергетики.

Швеція

Швеція є світовим лідером у сфері декарбонізації і має на меті скоротити викиди парникових газів на 59% до 2030 р. порівняно з 2005 р., а також досягти вуглецево-нейтральної економіки до 2045 року. Швеція була першою країною, яка ввела податок на викиди CO₂ у 1991 р. і наразі має найвищу величину цього податку у світі. Практика підтвердила ефективність цього заходу у стимулюванні декарбонізації і розвитку ВДЕ. Переважна частина парникових газів в країні походить від транспортного сектора, що залишається залежним від нафти. Швеція має на меті скоротити викиди на транспорті на 70% протягом періоду 2010-2030 рр., для чого підтримує електрифікацію сектору та впровадження біопалив другого покоління.

Протягом останніх 20 років рівень загального енергопостачання в Швеції залишається відносно стабільним на рівні близько 2000 ПДж/рік. Природний газ не відіграє великої ролі – наразі його частка у загальному постачанні енергії становить лише 2% (рис. 1). Мережа природного газу обмежена західним узбережжям країни, де ПГ забезпечує близько 20% ЗППЕ, головним чином, для опалення і потреб переробної промисловості [7, 8].

Весь природний газ імпортується в Швецію з Данії по одному трубопроводу, що можна розглядати як певний ризик для безпеки постачання. Біогаз, з іншого боку, виробляється всередині країни, і місця його виробництва розподілені рівномірно по території. Відповідно до цілей декарбонізації Швеції, довгостроковий план уряду – замінити природний газ біогазом, що сприятиме безпеці та сталості енергосистеми.

Основною схемою підтримки використання біогазу є звільнення від енергетичного податку та податку на CO_2 , коли біогаз застосовується в транспортному секторі чи для опалення і при цьому відповідає критеріям сталості. Крім того, виробництво біогазу фермерами заохочується за рахунок Програми розвитку сільських регіонів, частково фінансованої ЄС. Загальний бюджет інвестицій у біогазовий сектор до 2020 р. склав 279 млн SEK, розподілених між урядом (59%) та ЄС (41%).

У 2015 р. також було запроваджено субсидію для виробництва біогазу із гною шляхом анаеробного зброджування розміром до 0,40 SEK/кВт•год виробленого біогазу. Лише у період 2015-2016 рр. 51 біогазова установка отримала підтримку на суму 69 млн SEK. Програма субсидій діє до 2023 року із загальним бюджетом 385 млн SEK. У 2018 році бюджет було тимчасово збільшено на 270 млн SEK, а перелік видів сировини, які підпадають під дію субсидії, розширено.

Данія

Прийняті зобов'язання Данії зі скорочення викидів парникових газів та її досягнення у сфері відновлюваної енергетики роблять її одним з європейських лідерів «зеленого» енергетичного переходу і світовим лідером з розвитку вітрової енергетики. Країна прагне до 2030 р. скоротити викиди парникових газів на 70% від рівня 1990 р., а до 2050 р. – досягти вуглецевої нейтральності відповідно до цілей Паризької угоди. В країні планується поступово припинити використання вугільної електроенергії і до 2030 року досягти 100% ВДЕ у виробництві електроенергії і 55% ВДЕ у загальному споживанні енергії. Крім того, до 2030 року 90% ЦТ має забезпечуватися невикопними паливами, а також буде уведена заборона на продаж бензинових і дизельних автомобілів [9].

У період з 2006 р. дотепер ЗППЕ в Данії має загальну тенденцію до зниження і становить наразі трохи більше 600 ПДж. Частка природного газу за цей період зменшилася з 22% до 16%, а внесок ВДЕ збільшився з 16% до майже 36% (рис. 2) [10].

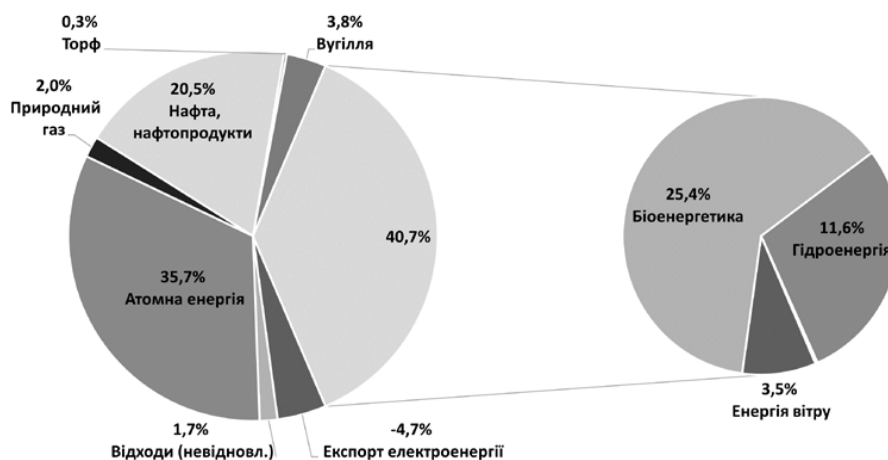


Рис. 1. Структура загального постачання енергії в Швеції (2019 р.) [7]

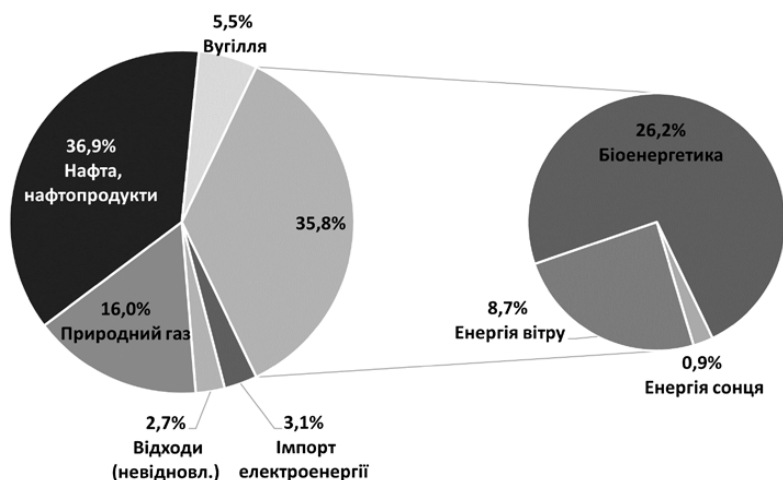


Рис. 2. Структура загального постачання енергії в Данії (2019 р.) [10]

Біоенергетика робить свій основний внесок у виробництво теплової енергії як для індивідуального опалення, так і для ЦТ, яке широко розвинене в Данії. Наразі біомаса (солома, деревна тріска і гранули, відходи) забезпечує понад 60% всього обсягу палив для потреб ЦТ. Окремих субсидій на виробництво теплової енергії із біомаси не існує, однак, підтримка виробництва «зеленої» електроенергії має опосередкований вплив, оскільки більша частина тепла для ЦТ виробляється на ТЕЦ. Крім того, використання біомаси в теплопостачанні не оподатковується податком на викиди CO₂. Використання біогазу для опалення стимулюється за допомогою преміального тарифу.

З 2013 року в нових будівлях Данії заборонено застосування котлів на мазуті, а з 2016 року в існуючих будівлях не дозволяється встановлювати новий котел на мазуті, якщо замість нього можна використати систему ЦТ або котел на природному газі.

Литва

За останнє десятиліття в Литві відбулося кілька енергетичних переходів. Після закриття своєї єдиної АЕС (два реактори були зупинені в 2004 і 2009 роках) Литва перетворилася з чистого експортера електроенергії на чистого імпортера. Сьогодні країна імпортує понад 70% ресурсів для покриття своїх потреб в електроенергії, а у власному виробництві енергії провідну роль відіграє біоенергетика (рис. 3). Більшість ТЕЦ, теплоцентралей і котельень Литви перейшли з природного газу на біомасу [11].

До 2030 р. Литва планує скоротити імпорт електроенергії вдвічі, а до 2050 р. – виробляти всю електроенергію всередині країни із часткою ВДЕ 70%. Країна прагне досягти 38% відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії до 2025 р. та принаймні 45% – до 2030 р. [12].

Природний газ був основою енергетичного балансу Литви після виведення з експлуатації АЕС, але останніми роками його роль суттєво зменшилася внаслідок росту інвестицій у ВДЕ, закриття старих ТЕЦ та котельних на ПГ та збільшення використання біомаси в системах ЦТ. Якщо у 2010 р. частка природного газу становила 35% у ЗППЕ, 54% у загальному виробництві електроенергії і 62% у виробництві теплової енергії, то у 2019 р. ці показники значно скоротилися до, відповідно, 24%, 16% та 18%.

З 2019 р. виробництво «зеленої» електроенергії підтримується змінним преміальним тарифом. Аукціони проводяться технологічно нейтральним способом, що дозволяє вітровим, сонячним, біомасовим і гідроенергетичним установкам конкурувати за преміальний тариф на основі найдешевшої вартості виробленої електроенергії. Держава виділяє на конкурсній основі надбавку за виробництво «зеленої» електроенергії протягом 12 років, щоб до 2025 року досягти загалом 5 ТВт•год електроенергії з ВДЕ. Щорічні аукціони планується проводити до 1 липня 2025 року або, як альтернатива, до досягнення цілі у 5 ТВт•год з ВДЕ.

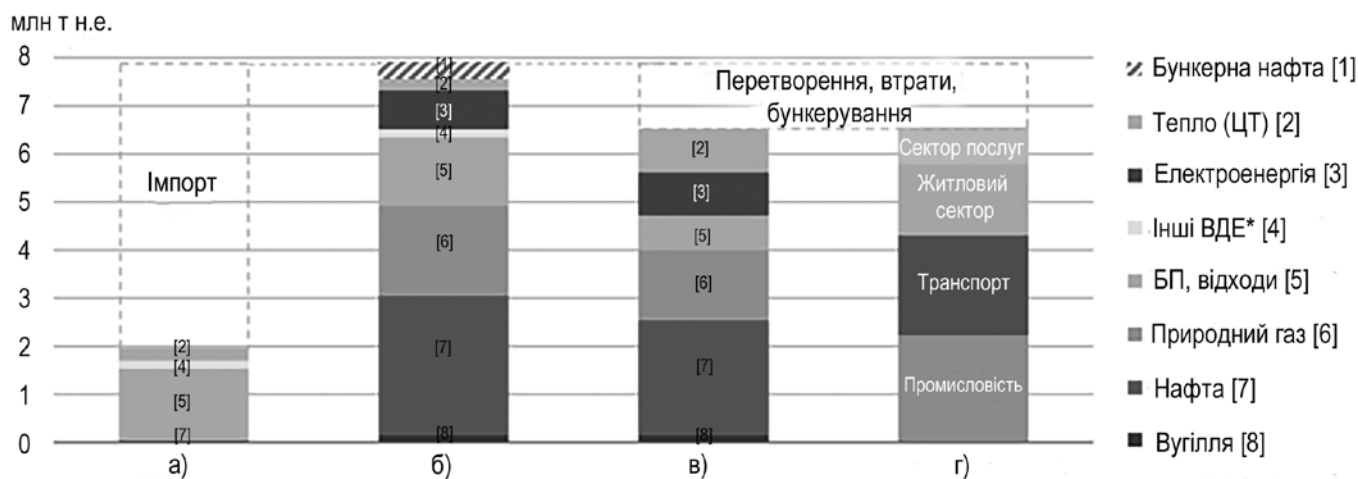


Рис. 3. Структура енергетичної системи Литви за видами палив та секторами, (2019 р.) [11]:

* інші ВДЕ: енергія вітру, гідроенергія, сонячна енергія, геотермальна енергія

а) виробництво енергії, б) загальне постачання енергії плюс бункерування палив для міжнародної авіації та морських перевезень (не входить до загального постачання), в) загальне кінцеве споживання енергії за видами палив, г) загальне кінцеве споживання енергії за секторами

Частка ВДЕ в централізованому теплопостачанні зросла втричі за період 2011-2018 рр. в результаті впровадження відповідних механізмів стимулювання. Підтримка надавалась при переході з викопного палива на біомасу та використання теплових насосів. Закон Литви «Про тепловий сектор» (2018 р.) не лише регулює якість постачання, конкуренцію та доступ до теплових мереж, але й заохочує використання біопалива та інші ВДЕ. Постачальники теплової енергії зобов'язані купувати все тепло з відновлюваних джерел, вироблене незалежними виробниками, якщо воно дешевше, ніж тепло, вироблене самим теплопостачальником, і при цьому відповідає екологічним вимогам, вимогам якості, а також стандартам безпеки постачання. Проекти з використання ВДЕ для цілей опалення та охолодження звільнені від екологічного податку і мають право на отримання позик та субсидій в рамках спеціальної Програми зі зміни клімату.

Австрія

Австрія поставила за мету досягти 100% електроенергії з ВДЕ до 2030 р., а також прагне стати вуглецево нейтральною не пізніше 2040 р. Станом на 2018 р., вже 77% електроенергії виробляється з відновлюваних джерел, тоді як декарбонізація теплопостачання та транспортного сектору являє собою більш складну задачу. Країна планує до 2035 р. відмовитися від систем опалення на нафті та вугіллі, а до 2025 року – обмежити використання природного газу для теплопостачання нових будинків [13].

Австрія ще суттєво залежить від імпорту енергоносіїв (рис. 4), маючи за останнє десятиліття середній рівень самозабезпечення енергетичними ресурсами близько 36%. З іншого боку, обсяг використання ВДЕ постійно зростає і становить наразі 36,5% валового кінцевого споживання енергії.

Довгострокова стратегія країни полягає у забезпеченні споживання біометану і відновлюваного водню власного виробництва, які будуть закачуватися в газову мережу. В контексті підготовки Національної водневої стратегії розробляється «Австрійська біогазова карта» і карта «Електроенергія у газ» (P2G). На карти буде нанесено потенційні місця виробництва біометану і «зеленого» водню, що є зручними з точки зору підключення до газової мережі. З метою надання податкових пільг для виробників відновлюваних газів, у 2020 р. було внесено зміни до закону Австрії «Про оподаткування природного газу».

Опалення та охолодження з використанням ВДЕ підтримується за допомогою різних схем стимулювання як на рівні країни, так і на рівні окремих федеральних земель. Для розвитку ВДЕ на транспорті застосовується система квот. Інвестиційні гранти на переобладнання транспортних засобів або придбання електромобілів також доступні в рамках Програми екологічної мобільності [15].

Висновки та рекомендації

За останні десятиліття країни ЄС досягли значних успіхів у скороченні споживання викопних палив,

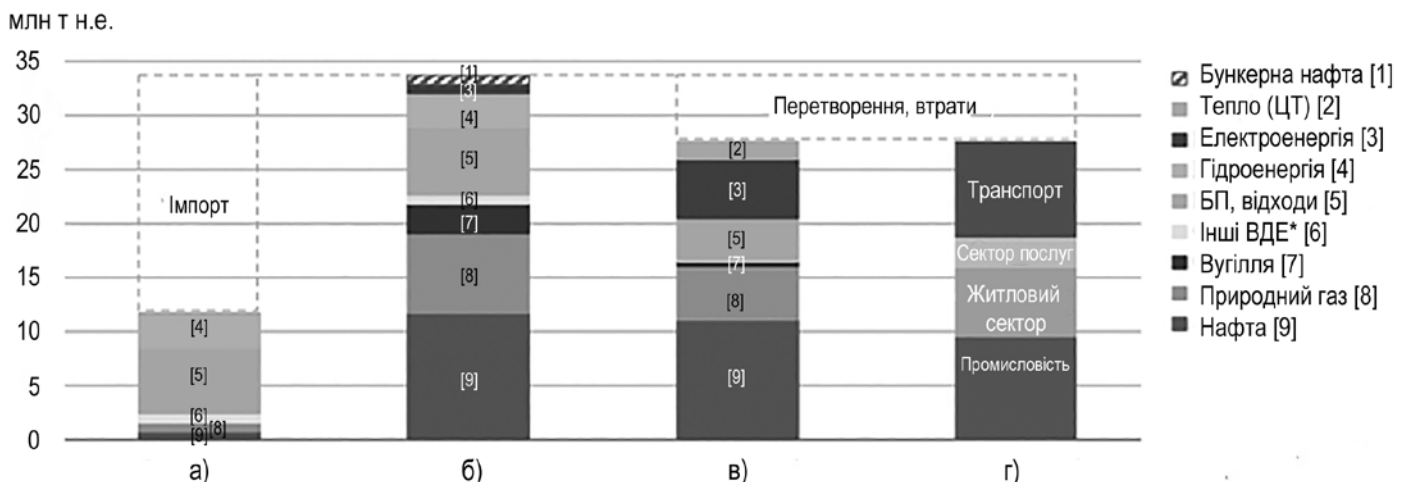


Рис. 4. Структура енергетичної системи Австрії за видами палив та секторами, (2018 р.) [14]:

* інші ВДЕ: енергія вітру, сонячна енергія, геотермальна енергія

1 – промисловість, 2 – транспорт, 3 – житловий сектор, 4 – сектор послуг

а) виробництво енергії, б) загальне постачання первинної енергії, в) загальне кінцеве споживання енергії за видами палив, г) загальне кінцеве споживання енергії за секторами

розвитку відновлюваних джерел енергії, підвищенні енергоефективності. З кінця 2019 року «зелений» перехід в ЄС реалізується в рамках Європейського зеленого курсу – комплексної стратегії переходу до сталої економіки, чистої енергетики і кліматичної нейтральності Європи до 2050 року. Після початку війни Росії проти України, вже на початку березня 2022 р., Міжнародне енергетичне агентство і Європейська Комісія представили свої пропозиції заходів по досягненню незалежності від російського природного газу та інших викопних палив з Росії. Досвід комплексної та послідовної політики ЄС в енергетичній сфері має стати прикладом для України у забезпеченні ефективного розвитку відновлюваної енергетики і загальної декарбонізації економіки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Georgii Geletukha*. Prospects of Biomethane Development in Ukraine. Presentation at the webinar “Biomethane: transfer of technologies, policies and best practices from European experience”, 10.11.2021.
https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/10/BIOFIT_Ukraine-10-Nov-2021_2_UABIO_Biomethane-in-Ukraine.pdf
2. *Георгій Гелетука*. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Презентація на міжнародній конференції “Біоенергетика в Агрокомплексі: актуальні технології в сучасних реаліях, практичні кейси”, Київ, 27.10.2021. https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/10/1_Geletuha-27-zhovtnya-2021-r.pdf
3. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*. IEA, 03.03.2022. <https://bit.ly/38LZhQ0>
4. *Железна Т.А.* Європейський «зелений» курс і нові можливості для розвитку відновлюваної енергетики // Теплофізика та теплоенергетика. – 2021, т. 43, № 1, с. 75-81. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>
5. *REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy*. European Commission, March 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_22_1513
6. *Renewable energy statistics*. Eurostat, January 2022. <https://bit.ly/3ElXqx6>
7. *Implementation of bioenergy in Sweden – 2021 update*. Country Reports, IEA Bioenergy, 2021.
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Sweden_final.pdf
8. *Energy Policies of IEA Countries – Sweden 2019 Review*. IEA, 2019. <https://bit.ly/3JRkULw>
9. *Denmark. Key energy statistics*. IEA, 2020. <https://www.iea.org/countries/denmark>
10. *Implementation of bioenergy in Denmark – 2021 update*. Country Reports, IEA Bioenergy, 2021.
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Denmark_final.pdf
11. *Lithuania 2021*. Energy Policy Review. IEA, 2021. <https://bit.ly/38QpOvz>
12. *Lithuania*. Key energy statistics. IEA, 2019. <https://www.iea.org/countries/Lithuania>
13. *Austria*. Key energy statistics. IEA, 2020. <https://www.iea.org/countries/Austria>
14. *Austria 2020*. Energy Policy Review. IEA, 2020. <https://bit.ly/3K2M6aB>
15. *Legal Sources on Renewable Energy*. Austria: Overall Summary.
<http://www.res-legal.eu/en/search-by-country/austria/>

EXPERIENCE OF EU COUNTRIES IN DEVELOPING RENEWABLE ENERGY AND REDUCING NATURAL GAS CONSUMPTION

**Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.,
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.2.2022.6>

The aim of the work is to analyse the experience of EU countries in reducing the consumption of natural gas and other fossil fuels, the development of renewable energy sources and improving energy efficiency in order to determine the most effective measures for their implementation in Ukraine. In the last months before the start of Russia's war against Ukraine, there was a significant increase and fluctuations in natural gas prices in Europe. After a period of some stabilization, there was a sharp surge in prices with a peak of up to 2300 EUR/1000 m³ in the first half of March 2022 (TTF gas hub data). By mid-April 2022, the gas price dropped to 1000...1100 EUR/1000 m³, however there is no objective reason for its further reduction. The urgent task for the European Union and for Ukraine is to completely reject Russian natural gas. It is likely that even after switching to other potential suppliers (such as Qatar or the United States for exporting liquefied natural gas), the prices will not fall due to reduced supply of Russian gas in the market and increased competition for this energy source. Among the priority measures to replace Russian natural gas, most experts name the large-scale development of renewable energy sources and the implementation of energy efficiency measures. It is important to note that biomethane and all types of solid biomass are becoming fully competitive with natural gas at the current prices from an economic point of view. For many years, the European Union has been pursuing a comprehensive and consistent policy of reducing fossil fuel consumption, developing renewable energy and improving energy efficiency. Currently, the EU countries are making significant efforts to ensure the overall decarbonisation of the economy, a significant part of which is the decarbonisation of energy. Perspective areas include the introduction of production and consumption of biomethane, renewable hydrogen, and second-generation biofuels, as well as electrification of transport and industry. References 15, figures 4.

Keywords: renewable energy, renewable energy sources, decarbonization, bioenergy, biomass, energy efficiency.

1. *Georgii Geletukha*. Prospects of Biomethane Development in Ukraine. Presentation at the webinar "Biomethane: transfer of technologies, policies and best practices from European experience", 10.11.2021.

https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/10/BIOFIT_Ukraine-10-Nov-2021_2_UABIO_Biomethane-in-Ukraine.pdf

2. *Georgii Geletukha*. Stan ta perspekyivy rozvytku bioenergetyky v Ukrayini. [The state and prospects of bioenergy development in Ukraine.]. Presentation at the international conference "Bioenergy in the Agrocomplex: current technologies in modern realities, practical cases", Kyiv, 27.10.2021. (Ukr.) https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/10/1_Geletuha-27-zhovtnya-2021-r.pdf

3. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*. IEA, 03.03.2022. <https://bit.ly/38LZhQ0>

4. *Zheliezna T.A.* Yevropeyskyi «zelenyi» kurs i novi mozhlyvosti dlia rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky [European Green Deal and new opportunities for the development of renewable energy]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 43, No. 1 (2021). – P. 75-81. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>

5. *REPowerEU*: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy. European Commission, March 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_22_1513

6. *Renewable energy statistics*. Eurostat, January 2022. <https://bit.ly/3EIXqx6>

7. *Implementation of bioenergy in Sweden – 2021 update*. Country Reports, IEA Bioenergy, 2021.

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Sweden_final.pdf

8. *Energy Policies of IEA Countries – Sweden 2019 Review*. IEA, 2019. <https://bit.ly/3JRkULw>

9. *Denmark*. Key energy statistics. IEA, 2020. <https://www.iea.org/countries/denmark>

10. *Implementation of bioenergy in Denmark – 2021 update*. Country Reports, IEA Bioenergy, 2021.

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Denmark_final.pdf

11. *Lithuania 2021*. Energy Policy Review. IEA, 2021. <https://bit.ly/38QpOvz>

12. *Lithuania*. Key energy statistics. IEA, 2019. <https://www.iea.org/countries/Lithuania>

13. *Austria*. Key energy statistics. IEA, 2020. <https://www.iea.org/countries/Austria>

14. *Austria 2020*. Energy Policy Review. IEA, 2020. <https://bit.ly/3K2M6aB>

15. *Legal Sources on Renewable Energy*. Austria: Overall Summary.

<http://www.res-legal.eu/en/search-by-country/austria/>

Отримано 20.04.2022

Received 20.04.2022

УДК 662.7

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВ ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ ЯК АВІАЦІЙНОГО ПАЛИВА

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

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.7>

Проаналізовано основні технології отримання біопалив другого покоління для використання в авіації. Проведено попереднє техніко-економічне обґрунтування виробництва авіаційного біопалива у вигляді гідроочищених естерів та жирних кислот з олії ріжжію в Україні.

The main technologies for second generation biofuels intended for use in aviation are analyzed. Preliminary feasibility study is carried out for the production of jet biofuel in the form of hydro-treated esters and fatty acids from false flax oil in Ukraine.

Бібл. 15, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: декарбонізація, відновлювані джерела енергії, біомаса, рідкі біопалива, біопалива другого покоління, авіаційне біопаливо.

БПП – біопалива II покоління;
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
НПЗ – нафтопереробний завод;
ПГ – парникові гази;
ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;
с/г – сільське господарство;

HEFA – гідроочищені естери та жирні кислоти;
HVO – гідроочищена рослинна олія;
SPK – синтетичний парафіновий керосин;
н.д. – немає даних
н.е. – нафтовий еквівалент;
с.р. – суха речовина.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю глобальної декарбонізації економіки, зокрема транспортного сектору. Ефективним заходом в даному напрямку є перехід на біопалива другого покоління. Особливо важливим це є для авіації – сегменту транспорту, що важко піддається декарбонізації.

Метою роботи є аналіз перспектив розвитку даного сектору біоенергетики у світі та для умов України.

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

Місце транспортного сектору в глобальному процесі декарбонізації

Транспортний сектор є потужним джерелом викидів парникових газів у світі. Так, наприклад, в США його частка у загальному обсягу емісії ПГ складає близько 29%, в ЄС – 27%, а загалом по світу – 16%. Ініціатива «Європейський зелений курс» спрямована на перехід Європи до сталої економіки, чистої енергетики і кліматичної нейтральності до 2050 р. Порівняно з іншими секторами, транспортний сектор ЄС характеризується найменшою часткою вико-

ристання ВДЕ (близько 10% у 2020 р.), тому в рамках реалізації Європейського зеленого курсу поставлено за мету підняти цей показник до 24% у 2030 р. Для цього планується суттєве збільшення споживання «зеленої» електроенергії, біопалив II покоління і низьковуглецевих палив. Для виконання амбітної мети по досягненню кліматичної нейтральності до 2050 р. Євросоюз має скоротити викиди парникових газів на 55% до 2030 р. від рівня 1990 р. До третини обсягу цього скорочення припадає на транспорт (рис. 1), що підтверджує нагальну необхідність впровадження ВДЕ у цьому секторі [1].

Порівняно з іншими секторами, транспорт важко піддається декарбонізації; особливо це стосується таких сегментів як авіаційний і водний транспорт, де, на відміну від дорожнього транспорту, обмежені можливості по запровадженню електрифікації. Отже, у цих сегментах необхідно переходити, в першу чергу, на використання рідких біопалив II покоління.

До 2015 р. виробництво БПП для потреб авіації складало менше 1 млн л/рік, а з 2016 р. збільшилося до близько 7 млн л/рік (рис. 2). Прогнозується, що цей обсяг може зрости до 1 млрд л/рік у 2023 р. і до

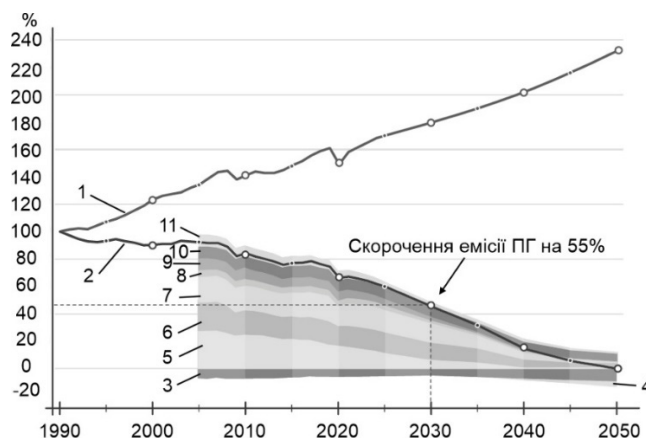


Рис. 1. Очікувана динаміка скорочення викидів парникових газів в ЄС до 2050 р., % [1]:

1 – валовий внутрішній продукт; 2 – емісія ПГ (нетто); 3 – землекористування та ліси; 4 – технології видалення вуглецю; 5 – енергетика; 6 – промисловість; 7 – транспорт; 8 – сфера послуг; 9 – населення; 10 – сільське господарство (не CO₂); 11 – інше (не CO₂)

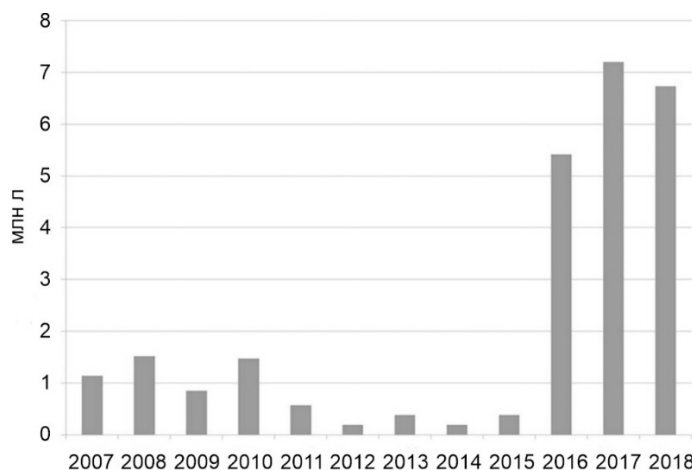


Рис. 2. Виробництво біопалив II покоління для авіації у світі, млн л [2]

8 млрд л/рік у 2030 р. Однак, цього вкрай недостатньо, оскільки для помітного зменшення вуглецевого сліду авіації світовий обсяг споживання БПП має становити понад 100 млрд л/рік. Наразі всі БПП в авіації можуть застосовуватися тільки у суміші з традиційним авіапаливом, хоча ряд компаній працює над отриманням синтетичних біопалив, які можуть використовуватися в чистому вигляді. Основною перешкодою для нарощування виробництва біопалив II покоління для потреб авіації є повільна комерціалізація відповідних технологій, оскільки сьогодні більшість механізмів підтримки спрямовані на розвиток інших видів БПП, наприклад відновлюваного дизелю [2].

Авіаційні біопалива II покоління можуть бути отримані з лігноцелюлозної сировини, нехарчо-

вих олій та жирів за допомогою термохімічних, біохімічних, олеохімічних та гібридних технологій. Треба зазначити, що такі біопалива сепаруються як окрема фракція в процесі конверсії, і ця фракція може становити 10...70% в залежності від виду технології [3]. Кінцевим продуктом є синтетичний парафіновий керосин, синтетичний керосин з ароматичними складовими та інші біорідини, які можуть використовуватися у суміші з традиційним авіапаливом (рис. 3).

На сьогодні єдиною технологією отримання альтернативних авіаційних палив, яка повністю досягла комерційного рівня, є технологія, пов'язана з виробництвом гідроочищених естерів та жирних кислот (HEFA – Hydro-treated esters and fatty acids). Причиною можливості комерціалізації став розвиток технології

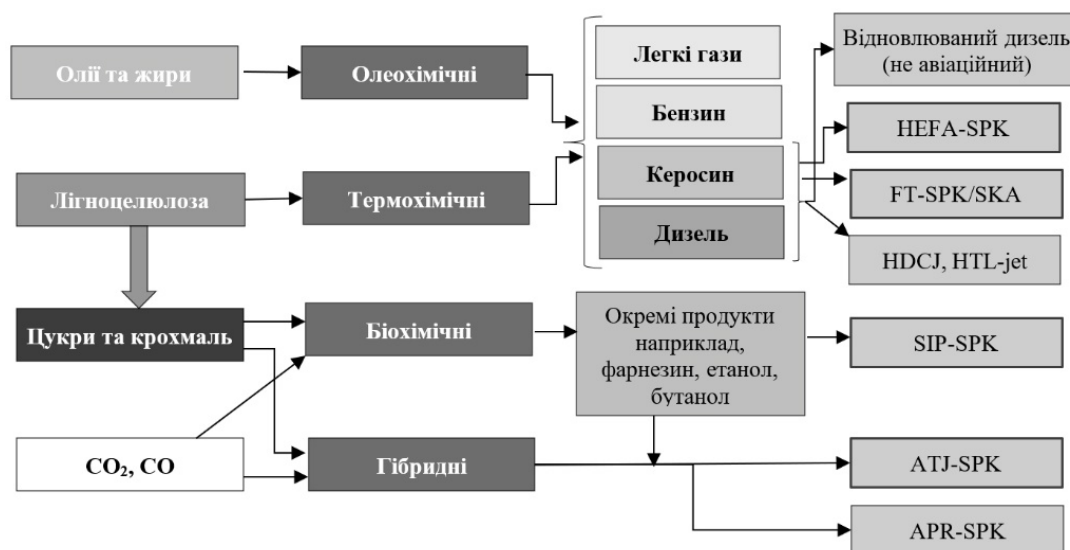


Рис. 3. Технології виробництва біопалив II покоління для потреб авіації [2]:

HEFA-SPK* – синтетичний парафіновий керосин, отриманий з гідроочищених естерів жирних кислот; **FT-SPK/SKA*** – синтетичний парафіновий керосин/синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша; **HDCJ** – гідроочищене деполімерізоване целюлозне паливо; **HTL-jet*** – паливо, отримане гідротермічним зрідженням; **SIP-SPK*** – синтетичний ізопарафіновий керосин; **APR-SPK** – синтетичний парафіновий керосин, отриманий реформінгом водної фази; **ATJ-SPK*** – синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією конверсії спиртів (етанолу, ізобутанолу); * – технології, сертифіковані за стандартом ASTM D1655 для біопалив, призначених для змішування з авіапаливом

отримання відновлюваного дизелю – гідроочищеної рослинної олії (HVO – hydro-treated vegetable oil). Кожна установка з виробництва HVO може сепарувати 15...50% фракції гідроочищених естерів та жирних кислот, з яких можна отримати авіаційне біопаливо – синтетичний парафіновий керосин (HEFA-SPK) [2]. За своїми характеристиками це синтетичне паливо близьке до традиційного керосину – палива для реактивних двигунів (табл. 1). Технологія виробництва керосину HEFA-SPK була сертифікована у 2011 р. за стандартом ASTM D1655 для біопалив, призначених для змішування з авіапаливом, з максимально дозволеною часткою у суміші – 50% (табл. 2). За оцінками експертів, керосин HEFA-SPK може бути найдешевшим авіаційним біопаливом II покоління [4]. Прогнозується, що технологія HEFA залишатиметься основним джерелом для отримання БПІІ для авіації протягом, щонайменше, 10 років.

Технологією, близькою до досягнення комерційного рівня, є газифікація з синтезом Фішера-Тропша (рис. 4). Ця технологія включає газифікацію біомаси, очищення виробленого синтетичного газу, конверсію газу у рідину

Фішера-Тропша, гідрообробку та/або гідрокрекінг рідини з отриманням низки кінцевих продуктів, у тому числі фракції авіаційного біопалива. Інші технології (піроліз, гідротермічне зрідження, каталітичний гідротермоліз, синтез з використанням «зеленого» водню та CO₂) також мають значний потенціал розвитку, але, за експертними оцінками, вийдуть на ринок у період 2030-2040 рр.

Найближчими роками різними компаніями планується будівництво більше десяти нових установок для виробництва авіаційних біопалив II покоління (табл. 3). На більшості з них буде отримуватися синтетичний парафіновий керосин за технологією HEFA, також будуть впроваджуватися технології конверсії спиртів (етанолу, ізобутанолу) і газифікація з синтезом Фішера-Тропша.

Ситуація в Україні

В Україні прийнято ціль досягти кліматичної нейтральності до 2060 р., що зазначено в Національній економічній стратегії на період до 2030 року (2021 р.) [9]. Для досягнення цієї мети буде реалізовуватися декарбонізація економіки, впровадження ВДЕ та

Табл. 1. Основні характеристики палив для реактивних двигунів Jet A-1, TC-1, HEFA-SPK та гідроочищеної рослинної олії (HVO)

Параметр	Паливо для реактивних двигунів марки Jet A-1 ¹ [5]	Паливо для реактивних двигунів марок TC-1 ¹ [5]	Синтетичний парафіновий керосин (HEFA-SPK) ² [6]	Гідроочищена рослинна олія (HVO) Класу А ³ [7]
1. Густина за температури 15°C, кг/м ³	775...840	не менше 775*	730...772	765...800
2. Фракційний склад:				
10% переганяється за температури, не вище °C	205	175	205	н.д.
50% переганяється за температури, не вище °C	-	225	н.д.	н.д.
90% переганяється за температури, не вище °C	-	270	н.д.	н.д.
95% переганяється за температури, не вище °C	-	-	н.д.	360
98% переганяється за температури, не вище °C	-	280	н.д.	н.д.
температура кінця кипіння, не вище °C	300	-	300	н.д.
залишок від дистиляції, не більше %	1,5	-	1,5	н.д.
втрати під час перегонки, не більше %	1,5	-	1,5	н.д.
3. Кінематична в'язкість, мм ² /с	за температури мінус 20 °C не більше 8	за температури 20 °C не менше 1,25; за температури мінус 40 °C не більше 16	н.д.	за температури 40 °C 2...4,5
4. Нижча теплота згорання, не менше МДж/кг	42,8	43,12	н.д.	н.д.
5. Температура спалаху у закритому тиглі, °C	не нижче 38	не нижче 28	не нижче 38	вище 55
6. Температура початку кристалізації, °C	не вище мінус 40	не вище мінус 55	не вище мінус 40	н.д.
7. Кислотне число	не більше 0,015 мг КОН на 1 г	не > 0,7 мг КОН на 100 см ³ палива	не більше 0,015 мг КОН на 1 г	н.д.
8. Частка ароматичних вуглеводнів:	об'ємна не більше 25%	масова не > 22 %; об'ємна не більше 20	н.д.	масова не більше 1,1%
9. Концентрація фактичних смол, мг на 100 см ³ палива	не більше 7	не більше 5	не більше 7	н.д.
10. Масова частка загальної сірки	не більше 0,3%	не більше 0,25%	н.д.	не більше 5 мг/кг
11. Метиліві естери жирних кислот	не більше 50 мг/кг	-	не більше 5 мг/кг	не більше 7% об'ємних

* – Густина палива для реактивних двигунів марок ТС-1 за температури 20 °С.

¹ – Значення показників палив для реактивних двигунів марки Jet A-1 та ТС-1 відповідають вимогам чинного в Україні технічного регламенту щодо вимог до авіаційного бензину та палив для реактивних двигунів.

² – Значення показників HEFA-SPK відповідають вимогам стандарту ASTM D7566 Додаток A2.

³ – Значення показників HVO відповідають вимогам стандарту BS EN 15940.

Табл. 2. Сертифіковані за стандартом ASTM D1655 технології отримання біопалив II покоління для потреб авіації [2, 8]

Біопаливо, технологія	Сировина	Максимальна частка у суміші з авіапаливом	Рік сертифікації
Синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK)	Тверді побутові відходи, відходи с/г, лісові відходи, енергетичні культури	50%	2009
Синтетичний парафіновий керосин, отриманий з гідроочищених естерів та жирних кислот (HEFA-SPK)	Використана харчова олія, нехарчові рослинні олії (наприклад, олія ятрофи), тваринні жири	50%	2011
Синтетичний ізопарафіновий керосин (SIP-SPK)	Цукри з лігноцелюлозної сировини	10%	2014
Синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SKA)	Тверді побутові відходи, відходи с/г, лісові відходи, енергетичні культури	50%	2015
Синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією конверсії спиртів (наразі тільки етанолу та ізобутанолу) (ATJ-SPK)	Цукри з лігноцелюлозної сировини	50%	2016 (для ізобутанолу) 2018 (для етанолу)
Гідрооброблені вуглеводні (HC-HEFA)	Олія з водоростей	10%	2020
Паливо, отримане гідротермічним зрідженням (HTL-jet)	Відпрацьована олія	50%	2020

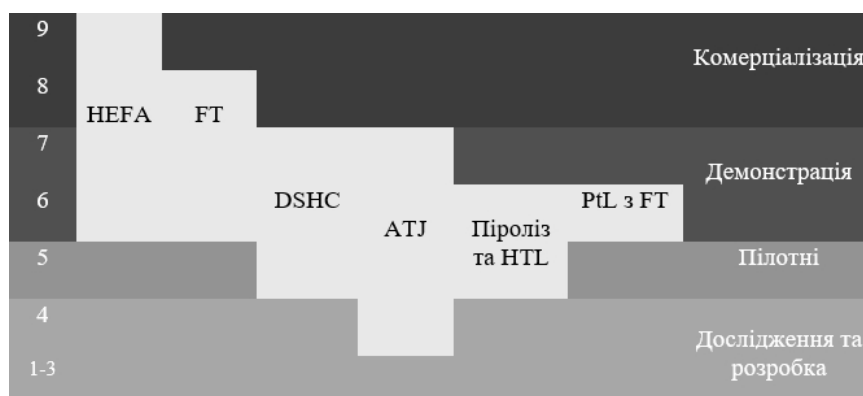


Рис. 4. Стадії розвитку різних технологій отримання біопалив II покоління для авіації [8]:
HEFA – гідроочищені естери та жирні кислоти; **FT** – технологія Фішера-Тропша; **DSHC** – пряме перетворення цукрів у вуглеводні; **ATJ** – паливо для реактивних двигунів, отримане за технологією конверсії спиртів; **HTL** – гідротермальне зрідження; **PtL** – рідке паливо з електричної енергії

Табл. 3. Існуючі та заплановані до будівництва установки з виробництва біопалив II покоління для потреб авіації [2]

Компанія, рік запуску	Технологія	Виробництво БПП (загальний обсяг продуктів), млн л/рік
World Energy (Paramount, США), 2020 р.	HEFA	25 (95)
Neste (Porvoo, Фінляндія), 2020 р.	HEFA	34 (128)
Gevo (Silsbee, США), 2020 р.	конверсія ізобутанолу	демонстраційна
Total (La Mede, Франція), 2020 р.	HEFA	немає даних
Fulcrum Bioenergy (Sierra, США), 2021 р.	газифікація з синтезом Фішера-Тропша	7 (26)
Red Rock Biofuels (Lakeview, США), 2021 р.	газифікація з синтезом Фішера-Тропша	6 (23)
Neste (Сінгапур і Роттердам), 2022 р.	HEFA	480 (1816)
SkYNRG (Delfzijl, Нідерланди), 2022 р.	HEFA	33 (125)
Lanzajet (Freedom Pines, США), 2022 р.	конверсія етанолу	10 (38)
World Energy (Paramount, США), 2022 р.	HEFA	150 (568)
Gevo (Luverne, США), 2023 р.	конверсія ізобутанолу	19 (72)
Go Sunshine (New Orleans, США), 2023 р.	HEFA	29 (110)
Fulcrum #2 (Indiana, США), 2023 р.	газифікація з синтезом Фішера-Тропша	21 (80)
Readifuels (США), 2023 р.	каталітичний гідротермоліз	24 (91)
Phillips 66 (San Francisco, США), 2024 р.	HEFA	290 (1098)
Total (Grandpuits, Франція), 2024 р.	HEFA	56 (212)
Preem (Gothenburg, Швеція), 2024 р.	HEFA	70 (265)
Lanzajet (США), 2024 р.	конверсія етанолу	90 (340)
Velocys (Altalto, Об'єднане Королівство), 2025 р.	газифікація з синтезом Фішера-Тропша	16 (60)

синхронізація із ініціативою «Європейський зелений курс». На сьогодні транспортний сектор в Україні відповідальний за 12% загального обсягу викидів парникових газів; внесок цього сектору у загальне скорочення емісії ПГ до 2030 р. очікується на рівні 11% [10].

За даними 2019 р., частка відновлюваної енергії в кінцевому споживанні на транспорті складала 3,1% (при плановому показнику 9%). Єдиним рідким біопаливом, що виробляється зараз в Україні, є біоетанол (88,1 тис. т н.е. у 2019 р.) [11]. Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року (2018 р.) поставлено завдання збільшити рівень застосування альтернативних видів палива та електроенергії до 50% до 2030 року [12]. Досягнення такої амбітної мети у транспортному секторі потребує широкого впровадження ВДЕ, у тому числі біопалив другого покоління.

Україна, разом з іншими країнами-членами Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) добровільно представила в ІКАО План дій щодо зменшення викидів CO_2 в авіації (2021 р.) [13]. В документі зазначено, що комплексний підхід до питання скорочення викидів CO_2 в авіації має включати використання низьковуглецевих сталих альтернативних палив.

У 2021 р. баланс вітчизняного ринку авіаційного палива склав майже 365 тис. т, включаючи 204 тис. т авіапалива, виробленого на Кременчуцькому НПЗ (ПАТ «Укртатнафта») та 161 тис. т імпорту, зокрема, 81,4 тис. т з Білорусі, 57,1 тис. т з Литви та 22,5 тис. т – морські постачання. У 2020 р. споживання авіапалива в Україні становило 270 тис. т [14].

Вітчизняний агропромисловий комплекс виробляє різні види олійних культур, частина з яких не використовується для отримання харчових олій і може

бути перероблена у гідроочищені естери та жирні кислоти HEFA. Згідно із стандартом ASTM D1655, до 50% HEFA (за об'ємом) дозволяється змішувати з нафтовим реактивним паливом. Розглянемо попереднє ТЕО виробництва в Україні HEFA з нехарчової олії рижію. Орієнтуючись на середню врожайність насіння цієї культури 1,5 т/га, можна отримати від 500 кг олії рижію з гектару. Схема технологічного процесу виробництва HEFA зображена на рис. 5.

За оцінками [15], питомий вихід керосину HEFA з олії рижію складає 768,9 л/т с.р. олії, бензину – 417,2 л/т с.р. олії, дизельного палива – 19,6 л/т с.р. олії та пропану – 4,2 л/т с.р. олії. Таким чином, з гектару рижію

в Україні можна виробити від 344 л авіапалива HEFA. Результати попереднього ТЕО виробництва HEFA з олії рижію на базі заводу із переробки 715 т с.р. олії/добу [15], виконане для умов України та актуальних цін на паливо, представлено в табл. 4. Отримані результати показують, що за поточних умов проєкт не є життєздатним з огляду на високу вартість олії рижію. Для можливості прибуткового виробництва і продажу авіаційного біопалива HEFA на внутрішньому ринку необхідно працювати в напрямку здешевлення капітальних та операційних витрат проєкту та/або увести тимчасову державну субсидію на виробництво сталих рідких біопалив.

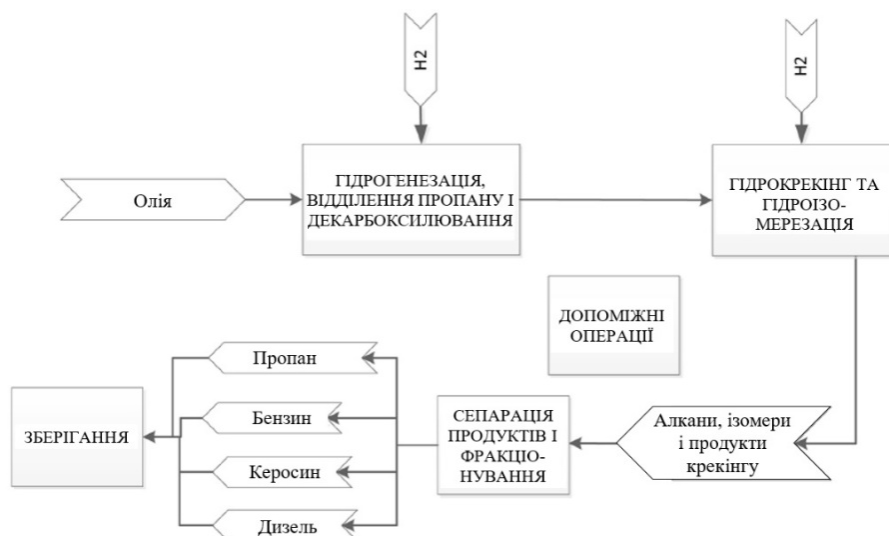


Рис. 5. Схема технологічного процесу виробництва HEFA [15]

Табл. 4. Попереднє ТЕО виробництва біопалива HEFA з олії рижію в Україні

Показники	Величина
Продуктивність заводу по HEFA, млн. л/рік	181
Вартість олії рижію, дол. США/т	1486
Споживання сировини (олія рижію), тис. т с.р./рік	235
Капітальні витрати*, млн. дол. США	354
Експлуатаційні витрати*, млн. дол. США/рік	427
Ціна продажу HEFA, дол. США/л	1,23
Ціна продажу бензину, дол. США/л	1,18
Ціна продажу дизельного палива, дол. США/л	1,19
Ціна продажу пропану, дол. США/л	0,67
Дохід від продажу біопалив, млн. дол. США/рік	344
Простий термін окупності, років	>10

* За даними [15].

** Продаж HEFA, бензину, дизельного палива та пропану прийнято відповідно до актуальних цін на ринку України у лютому 2022 р.

Висновки та рекомендації

Виробництво та використання рідких біопалив другого покоління для транспортного сектору є важливим і перспективним сегментом біоенергетики України. Розвиток цього напрямку сприятиме досягненню національних цілей в сферах відновлюваної енергетики та клімату, зокрема, Плану дій щодо скорочення викидів CO₂ в авіації із використанням низьковуглецевих сталих альтернативних палив. Україна має великий потенціал біомаси, у тому числі лігноцелюлозної та іншої нехарчової сировини, включаючи, нехарчові олії, доступної для виробництва рідких біопалив другого покоління. Наразі досягла комерціалізації тільки технології виробництва гідроочищених естерів та жирних кислот (HEFA) для отримання альтернативних авіаційних палив. Але поки що собівартість HEFA з вітчизняної олійної сировини вище за ринкову ціну традиційного палива для реактивних двигунів. Для можливості успішної реалізації проєктів у цьому секторі необхідне вдосконалення законодавчої бази, наприклад, щодо уведення державної субсидії на виробництво сталих рідких біопалив, і виконання науково-практичних робіт, спрямованих на здешевлення відповідних технологій та обладнання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *EU Climate Target Plan 2030. Key contributors and policy tools.* European Commission, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1610
2. *Susan van Dyk, Jack Saddler.* Progress in Commercialisation of Biojet fuels/SAF: Technologies, potential and challenges. IEA Bioenergy Task 39, 2021. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>
3. *Van Dyk et al.* Assessment of likely maturation pathways for production of biojet fuel from forest residue, 2019. <http://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2019/11/GARDN-NEC-21-ATM-project-final-report-public-release.pdf>
4. *Malthe Fredsgaard et al.* Process simulation and techno-economic assessment of Salicornia sp. based jet fuel refinery through Hermetia illucens sugars-to-lipids conversion and HEFA route // Biomass and Bioenergy.– 2021, v. 150, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106142>
5. *Постанова КМУ «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до авіаційного бензину та палив для реактивних двигунів» № 523 від 26.05.2021.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/523-2021-%D0%BF#Text>
6. *Перелік характеристик відновлюваного реактивного палива Neste, 2019.* https://www.neste.com/sites/neste.com/files/attachments/pds_neste_my_renewable_jet_fuel.pdf
7. *Перелік характеристик HVO, 2021.* <https://watsonfuels.co.uk/media/2703/hvo-technical-data-sheet.pdf>
8. *Jenny Trinh et al.* What Are the Policy Impacts on Renewable Jet Fuel in Sweden? // Energies. – 2021, v. 14 (21), 7194. <https://doi.org/10.3390/en14217194>
9. *Постанова КМУ «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» № 179 від 03.03.2021.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>
10. *Аналітичний огляд Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди.* Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, липень 2021. <https://bit.ly/3hOKZZE>.
11. *Звіт про результати стимулювання та використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел, в Україні за 2018-2019 рр. Держенергоефективності.* <https://saee.gov.ua/sites/default/files/Report%20to%20Energy%20Commun%20RES%20UKraine%202018-2019%20%28final%29.pdf>
12. *Розпорядження КМУ «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року № 430-р від 30.05.2018».* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
13. *Action plan of Ukraine for reducing aviation CO₂ emissions.* State Aviation Administration of Ukraine, 2021. [https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/Action-plan-of-Ukraine-for-reducing-aviation-CO₂-emissions-2021_compressed-1.pdf](https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/Action-plan-of-Ukraine-for-reducing-aviation-CO2-emissions-2021_compressed-1.pdf)
14. *Підсумки-2021: ринок авіагасу зріс до 365 тис. т.– ENKORR, 2022.* https://enkorrr.ua/uk/news/itogi-2021_rynok_aviakerosina_vyros_do_365_tys_t/249545
15. *L. Tao, A. Milbrandt, Y. Zhang et al.* Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel // Biotechnol Biofuels. – 2017, 10, 261. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>

PROSPECT FOR THE USE OF SECOND GENERATION BIOFUELS AS JET FUEL

Zheliezna T.A., Drahniiev S.V., Bashtovyi A.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.2.2022.7>

The aim of the work is to analyze the prospects for the development of bioenergy sector related to the production of second-generation aviation biofuels in the world and in Ukraine. The transport sector is a powerful source of greenhouse gas emissions. To meet the ambitious goal of achieving climate neutrality by 2050, the EU must reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030 from 1990 levels. According to experts, up to a third of this reduction is accounted for transport. Compared to other sectors, transport is difficult to decarbonize; this is especially true in segments such as aviation and water transport where electrification opportunities are limited. Therefore, in these segments it is necessary to move, first of all, to the use of second generation liquid biofuels. Today, the only technology for alternative aviation fuels that has fully reached the commercial level is the production of hydro-treated esters and fatty acids (HEFA). The reason for the possibility of commercialization was the development of technology for obtaining renewable diesel – hydro-treated vegetable oil (HVO). Each HVO plant can separate 15-50% of the fraction of hydro-treated esters and fatty acids, from which it is possible to obtain such aviation biofuel as synthetic paraffin kerosene (HEFA-SPK). The results of the preliminary feasibility study for the production of HEFA from false flax oil in Ukraine show that under the current conditions, such a project is not profitable given the high cost of this oil. To ensure profitable production and sale of HEFA aviation biofuel on Ukraine's domestic market, it is necessary to work towards reducing the capital and operating costs of the project and/or introduce a temporary state subsidy for the production of sustainable liquid biofuels.

References 15, tables 4, figures 5.

Key words: decarbonization, renewable energy sources, biomass, liquid biofuels, second generation biofuels, jet biofuel.

1. *EU Climate Target Plan 2030*. Key contributors and policy tools. European Commission, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1610

2. *Susan van Dyk, Jack Saddler*. Progress in Commercialisation of Biojet fuels/SAF: Technologies, potential and challenges. IEA Bioenergy Task 39, 2021. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>

3. *Van Dyk et al.* Assessment of likely maturation pathways for production of biojet fuel from forest residue, 2019.

<http://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2019/11/GARDN-NEC-21-ATM-project-final-report-public-release.pdf>

4. *Malthe Fredsgaard et al.* Process simulation and techno-economic assessment of Salicornia sp. based jet fuel refinery through *Hermetia illucens* sugars-to-lipids conversion and HEFA route // *Biomass and Bioenergy*. – 2021, v. 150, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106142>

5. *Postanova KMU* «Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu shchodo vymoh do aviatsiinoho benzynu ta palyv dlia reaktivnykh dvyhuniv» № 523 vid 26.05.2021 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On approval of the Technical Regulation on the requirements for aviation gasoline and jet fuel» No. 523 of 26.05.2021] (Ukr.) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/523-2021-%D0%BF#Text>

6. *Neste MY Renewable Jet Fuel*. Product Data Sheet, 2019.

https://www.neste.com/sites/neste.com/files/attachments/pds_neste_my_renewable_jet_fuel.pdf

7. *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)*. Technical Data Sheet, 2021. <https://watsonfuels.co.uk/media/2703/hvo-technical-data-sheet.pdf>

8. *Jenny Trinh et al.* What Are the Policy Impacts on Renewable Jet Fuel in Sweden? // *Energies*. – 2021, v. 14 (21), 7194. <https://doi.org/10.3390/en14217194>

9. *Postanova KMU* «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku» № 179 vid 03.03.2021 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030» No. 179 of 03.03.2021] (Ukr.) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>

10. *Analichnyi ohliad* Onovlenoho natsionalno vyznachenoho vnesku Ukrainy do Paryzkoï uhody. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [Analytical review of the Updated nationally determined contribution of Ukraine to the Paris agreement, Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine], July, 2021. (Ukr.) <https://bit.ly/3hOKZzE>

11. *Zvit pro rezultaty stymuliuvannia ta vykorystannia enerhii, vyroblenoï z vidnovliuvanykh dzherel, v Ukraini za 2018-2019 rr.* Derzhenerhoefektyvnosti [Report on the Promotion and Use of Energy from Renewable Sources in

Ukraine in the years of 2018-2019, State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine] (Ukr.)

<https://saee.gov.ua/sites/default/files/Report%20to%20Energy%20Commun%20RES%20UKraine%202018-2019%20%28final%29.pdf>

12. *Rozporiadzhennia KMU «Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku» № 430-r vid 30.05.2018* [Executive Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030» No. 430-p of 30.05.2018] (Ukr.)

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>

13. *Action plan of Ukraine for reducing aviation CO₂ emissions*. State Aviation Administration of Ukraine, 2021.

[https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/Action-plan-of-Ukraine-for-reducing-aviation-CO₂-emissions-2021_compressed-1.pdf](https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/Action-plan-of-Ukraine-for-reducing-aviation-CO2-emissions-2021_compressed-1.pdf)

14. *Pidsumky-2021: rynok aviahasu zris do 365 tys. t* [Results 2021: the aviation fuel market has grown up to 365 thousand tons]. ENKORR, 2022 (Ukr.)

https://enkorrr.ua/uk/news/itogi-2021_rynok_aviakerosina_vyros_do_365_tys_t/249545.

15. *L. Tao, A. Milbrandt, Y. Zhang et al. Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel // Biotechnol Biofuels. – 2017, 10, 261.* <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>

Отримано 16.02.2022

Received 16.02.2022

МОЖЛИВОСТІ СКОРОЧЕННЯ І ЗАМІЩЕННЯ СПОЖИВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ЦЕНТРАЛІЗОВАНОМУ ТЕПЛОПОСТАЧАННІ УКРАЇНИ

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.2.2022.8>

Сформульовано заходи для скорочення та заміщення споживання природного газу в Україні. Визначено очікуваний ефект від запровадження цих заходів. Проаналізовано можливості заміщення природного газу біомасою і твердими біопаливами при виробництві теплової енергії. Розглянуто перспективи виробництва біогазу та біометану в Україні.

Measures to reduce and replace natural gas consumption in Ukraine have been formulated. The expected effect from the implementation of these measures has been determined. The possibilities of replacing natural gas with biomass and solid biofuels in the production of thermal energy have been analyzed. Prospects for biogas and biomethane production in Ukraine have been considered.

Бібл. 5, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: відновлювана енергетика, відновлювані джерела енергії, біомаса, тверде біопаливо, біогаз, біометан.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

СОР – коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ЦТ – централізоване теплопостачання;

н.е. – нафтовий еквівалент.

Нижній індекс:

т – тепловий;

е – електричний.

Вступ

Війна Росії проти України поставила нашу державу, ЄС і світ перед викликом щодо найскорішого уведення ембарго на закупівлю нафти, газу і вугілля з країни-агресора. На жаль, близько 40% енергії Україна змушена закуповувати за кордоном, у тому числі у Росії. Фактичне споживання природного газу в 2021 р. становило 26,8 млрд м³, у тому числі населенням – 8,6 млрд м³, виробниками тепла – 6,3 млрд м³, промисловістю, бюджетними організаціями та іншими не побутовими споживачами – 11,9 млрд м³. Необхідний імпорту природного газу в Україну останніми роками складав 8...10 млрд м³/рік.

Метою роботи є визначення та аналіз необхідних кроків для відмови України від російського природного газу. **Методи дослідження** включають проведення техніко-економічних розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Запропоновані кроки для скорочення споживання природного газу в Україні

Прогнозовані обсяги скорочення та заміщення споживання природного газу у відповідності до програмних документів України та експертних оцінок авторів і представлено в табл. 1. Запропоновані захо-

ди включають як використання ВДЕ, так і підвищення енергоефективності та деякі організаційні підходи.

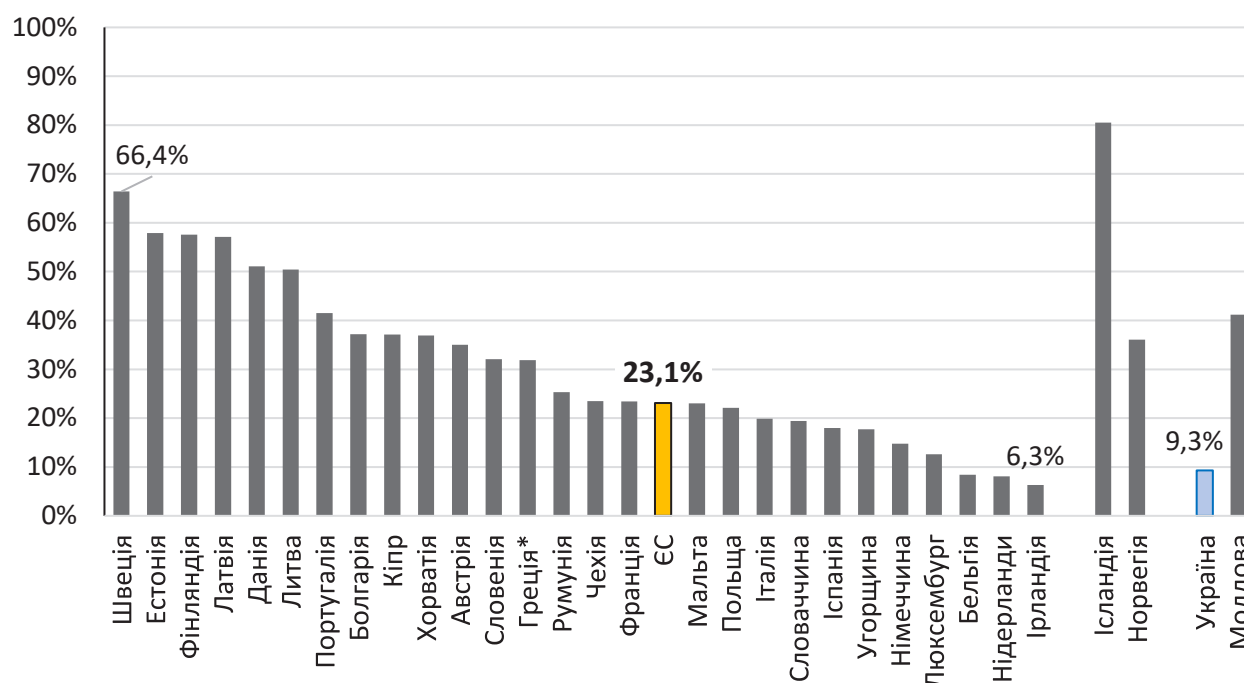
Як видно з таблиці, при прогнозованих планах розвитку до 2030 р. Україна здатна повністю скоротити/замістити імпортований природний газ у обсягах до 10 млрд м³/рік і стати повністю енергонезалежною від нього. До 2050 р. обсяг скорочення/заміщення природного газу може досягти майже 26 млрд м³/рік. Окремого аналізу потребує можливість заміщення природного газу біомасою, твердими біопаливами і біометаном.

Заміщення природного газу біомасою і твердими біопаливами при виробництві теплової енергії

Це один з найбільш рентабельних шляхів заміщення природного газу, особливо враховуючи нинішні і прогнозовані високі ціни на газ в ЄС, звідки Україна наразі його закуповує. Реальність цього напрямку демонструють вже досягнуті частки теплової енергії, що виробляється з відновлюваних джерел енергії, переважно з біомаси, в більшості країн ЄС: Швеція (66%), Естонія (58%), Фінляндія (58%), Латвія (57%) (рис. 1). В середньому в ЄС цей показник становить 23% від загальної кількості енергії, що використовується для опалення та охолодження, при цьому постійно зростаючи: з 12% у 2004 році до 23% у 2020 році.

Табл. 1. Прогнозовані обсяги скорочення та заміщення споживання природного газу в Україні від реалізації запропонованих заходів [1]

Найменування заходу	Прогнозовані обсяги скорочення споживання / заміщення природного газу, млрд м ³ /рік	
	до 2030 р.	до 2050 р.
Заміщення природного газу біомасою і твердими біопаливами при виробництві теплової енергії	3,0	10,3
Подальше будівництво вітрових і сонячних електростанцій	1,7	3,5
Виробництво біометану	0,8	3,7
Підвищення рівня гнучкості і декарбонізації енергосистеми України за рахунок біометану	0,2	0,8
Підвищення енергоефективності в системах ЦТ, будівлях і промисловості	2,8	5,6
Впровадження теплових насосів	0,8	1,2
Заохочення споживачів до тимчасового зниження температури у приміщеннях на 1°C	0,7	0,7
Всього	10,0	25,8



* Попередні дані

Рис. 1. Частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії для опалення та охолодження в ЄС та інших країнах у 2020 р. [2]

У виробництві теплової енергії Україна потенційно може замінити до 10 млрд м³ природного газу/рік біомасою. За даними Державної служби статисти-

ки України за 2020 р. [3], біоенергетика вже заміщує 5,2 млрд м³ природного газу/рік і може замінювати значно більше при зміні відношення держави до цього

сектору. Технологічну основу таких систем складатимуть котли, котельні і ТЕЦ на біомасі в індивідуальних будинках, у системах ЦТ і у промисловості.

Порівняння вартості одиниці енергії в різних енергоносіях в Україні приведено в табл. 2. Видно, що найдешевшими є різні види твердих біопалив, вартість одиниці енергії у яких складає 103...353 грн/ГДж з ПДВ. Аналогічний показник для природного газу для різних

категорій споживачів становить 299...1194 грн/ГДж з ПДВ. Ця суттєва різниця в ціні й зумовлює постійний і зростаючий інтерес до заміщення природного газу твердими біопаливами. За оцінками авторів, встановлена потужність біоенергетичного обладнання на твердому біопаливі до 2050 р. може зрости до 46,5 ГВт_т і 2,9 ГВт_е із загальним споживанням біомаси – майже 15 млн т н.е./рік (табл. 3).

Табл. 2. Порівняння вартості одиниці енергії в різних енергоносіях в Україні (травень 2022 р.)

Вид палива або енергоносія	Середня вартість з транспортом і ПДВ (на травень 2022 р.)	Нижча теплотворна здатність	Вартість одиниці енергії, грн/ГДж з ПДВ
	А	Б	А/Б
Природний газ для населення	10000 грн/тис. м ³	33,5 МДж/м ³	299
Природний газ для населення для бюджетної сфери	31300 грн/тис. м ³	33,5 МДж/м ³	934
Природний газ для промисловості	40000 грн/тис. м ³	33,5 МДж/м ³	1194
Вугілля	5200 грн/т	25 МДж/кг	208
Мазут	12700 грн/т	42 МДж/кг	302
Електроенергія для населення	1,68 грн/кВт·год	-	467
Електроенергія для побутових споживачів	3,5 грн/кВт·год	-	972
Електроенергія для побутових споживачів через тепловий насос з COP = 2,3	3,5 грн/кВт·год	-	423
Деревна тріска	2000 грн/т	12 МДж/кг	167
Гранули з деревини	6000 грн/т	17 МДж/кг	353
Гранули з лушпиння	5000 грн/т	17,5 МДж/кг	286
Тюки соломи чи стебел кукурудзи	1500 грн/т	14,6 МДж/кг	103

Табл. 3. Прогноз розвитку сектору біоенергетики до 2050 року в частині твердого біопалива [4]

Рік	Встановлена потужність		Споживання біопалива, млн т н.е.	Заміщення природного газу, млрд м ³	Скорочення викидів CO ₂ , млн т/рік	Інвестиції, млрд євро		Створення робочих місць, одиниць
	МВт _т	МВт _{ел}				мін.	макс.	
2020	8103	105	3,57	4,33	8,49	1,14	1,85	13334
2025	11955	552	5,18	6,29	12,32	2,74	4,39	23284
2030	18465	1295	7,36	8,94	17,53	5,24	8,39	39853
2035	29173	1908	10,06	12,22	23,95	7,90	12,64	64023
2040	37854	2421	12,40	15,06	29,51	10,28	16,41	85987
2045	43307	2738	13,85	16,82	32,97	11,75	18,75	99755
2050	46520	2940	14,71	17,86	35,01	12,63	20,15	107543

Виробництво біометану

Напрямок використання біогазу та біометану динамічно розвивається в ЄС. Їх сумарне виробництво може задовольнити сьогодні вже 4,6% попиту на природний газ в ЄС. Враховуючи зниження попиту на газ, біометан може покрити 30...40% потреби ЄС у газі до 2050 р. [5].

Україна може потенційно виробляти до 10 млрд м³ біометану/рік, переважно з аграрних відходів і залишків, таких як гній, послід, соломка злакових, стебла кукурудзи, стебла соняшника, жом цукрових буряків, меляса, силос кукурудзи, а також побутові відходи та інші види біомаси. До 2050 р. можна досягти загальних обсягів виробництва біогазу/біометану в країні до 6 млрд м³/рік, з яких частина може піти на експорт (рис. 2).

Біометан абсолютно готовий для закачування в газову мережу вже сьогодні; не потрібні інвестиції у модернізацію газових мереж і газового обладнання (газові пальники та арматура, двигуни, турбіни і т.п.). У сфері виробництва біометану Україна може конкурувати з будь-якими країнами світу. Вона має найбільшу в

Європі площу сільськогосподарських угідь, і, відповідно, один із найкращих в світі потенціалів аграрної сировини для отримання біометану. Україна може запропонувати найдешевшу сировину для виробництва біометану.

Біометанові заводи, окрім біометану, генерують дигестат, який може стати основним органічним добривом, необхідним для відродження українських ґрунтів. Наразі біометан – це найдешевший із можливих відновлюваних газів. Вартість біометану, за якою інвесторам стає вигідне його виробництво, складає біля 1000 дол. США/1000 м³. При нинішніх цінах на газ на біржах ЄС (близько 1300 дол. США/1000 м³) виробляти біометан в Україні абсолютно рентабельно як для внутрішнього споживання, так і для експорту. Висока ймовірність подальшого зростання ціни природного газу внаслідок можливого скорочення споживання або повного ембарго російського газу на ринках ЄС.

Висновки та рекомендації для України

Вважаємо, що заміщення природного газу місцевим біопаливом і біометаном має бути для держави пріоритетом, значно важливішим за експорт деревного

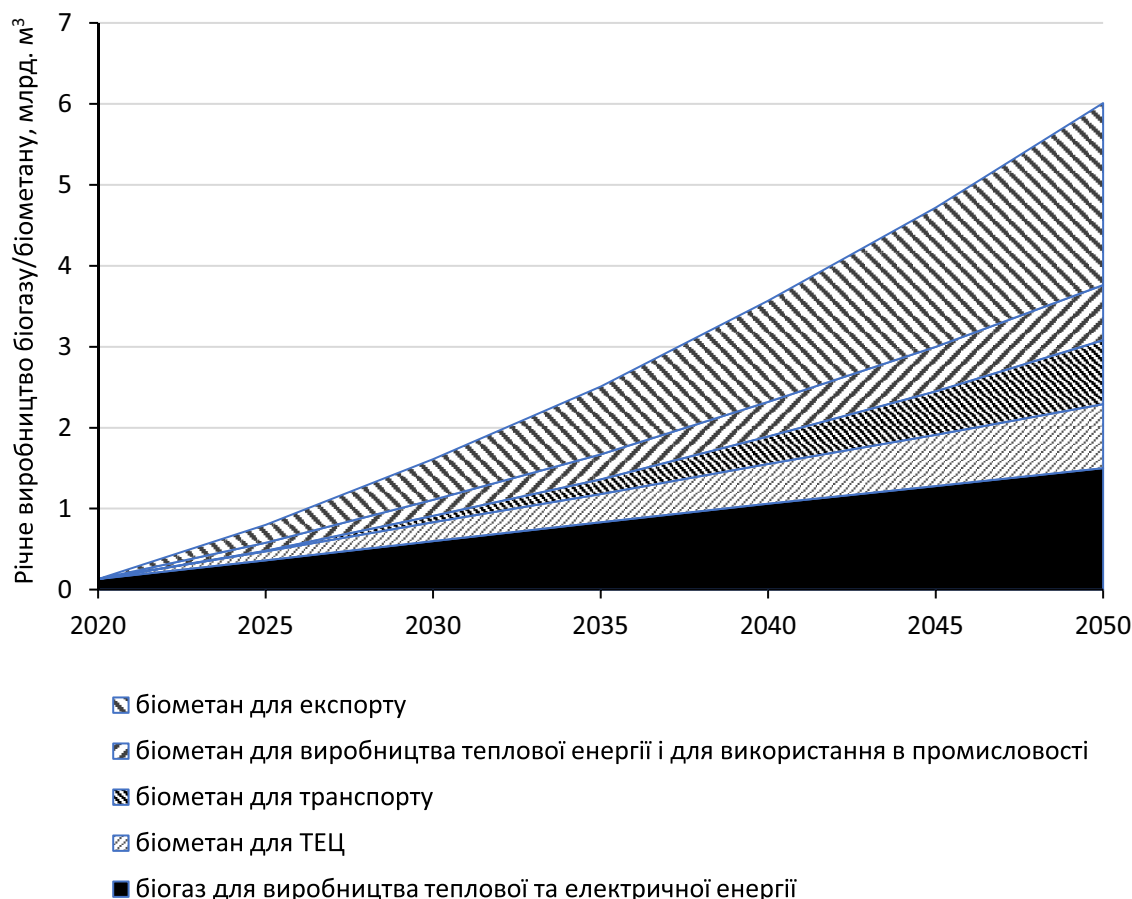


Рис. 2. Оцінка прогнозних обсягів виробництва біогазу та біометану в Україні до 2050 року [1]

палива чи його продаж деревообробним підприємствам для виготовлення деревних плит. До 2030 р. в цих секторах реально замінити до 4 млрд м³/рік природного газу.

Рекомендуємо наступні кроки для першочергового запровадження в Україні:

- Ввести регулювання державою цін на паливну деревину для суб'єктів господарювання, які отримали ліцензії на право виробництва теплової та електричної енергії. Це надасть можливість зменшити вартість деревного палива і прискорити заміщення імпортного газу.

- Дозволити оплату паливної сировини держлісгоспам пропорційно виплатам Гарантованого покупця виробникам електроенергії з біомаси.

- Запровадити систему електронної торгівлі твердим біопаливом (біопаливна біржа) із забезпеченням стандартів якості і гарантій постачання біопалива.

- Заборонити спалювання лісосічних відходів в лісі. Цей спосіб очищення лісосіки дозволяє діючий Лісовий кодекс України. Замість цього зобов'язати підприємства лісового господарства очищати лісосіку шляхом збирання і транспортування лісосічних відходів до найближчої дороги, звідки бізнес з задоволення купить і вивезе лісосічні відходи у якості палива.

- Звільнити від сплати податку за викиди CO₂ установки, що спалюють тверде біопаливо і біогаз/біометан.

- Створити реєстр біометану. Запровадити систему видачі гарантій походження для біометану.

- Зняти вимогу обов'язкової державної реєстрації для дигестату, зазначену в Законі України "Про пестициди та агрохімікати". Розробити і затвердити національний стандарт на дигестат при використанні його як органічного добрива чи поліпшувача ґрунту.

- Затвердити прийнятні для біометану вимоги щодо вмісту кисню (0,2...1%) у технічному регламенті природного газу.

Крім того, вважаємо, що Україні потрібно якнайшвидше розробити дієву і амбітну державну програму скорочення і заміщення споживання імпортного газу. Така програма має стати основою відновлення енергетики України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Георгій Гелетуха, Тетяна Желєзна, Семен Драгнєв, Ольга Гайдай.* Десять кроків України для відмови від російського природного газу. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України № 28, квітень 2022 р.

http://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/10-krokv-Ukrayiny-dlya-vidmovy-vid-PG_UKR.pdf

2. *Share of energy from renewable sources in heating and cooling 2020*, Eurostat.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Table_3_share_of_energy_from_renewable_sources_in_heating_and_cooling_2020.PNG

3. *Енергетичний баланс* України за 2020 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України 30.11.2021. <http://www.ukrstat.gov.ua/>

4. *Geletukha G., Zheliezna T.* Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050 // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021, v. 22 (5), p. 73-81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>

5. *EBA Statistical Report 2021.*

<https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/11/EBA-STATISTICAL-REPORT-2021-SHORT-VERSION.pdf>

OPPORTUNITIES FOR REDUCTION AND REPLACEMENT OF NATURAL GAS CONSUMPTION IN DISTRICT HEATING OF UKRAINE

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahniev 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/ttpe.2.2022.8>

The aim of the work is to identify and analyze the necessary steps for Ukraine to reject Russian natural gas. Russia's war against Ukraine has challenged our country, the EU and the world to an urgent introduction of embargo on the purchase of oil, gas and coal from the aggressor country. Unfortunately, Ukraine has to buy about 40% of its energy abroad, including from Russia, the required import of natural gas in recent years being 8... 10 billion m³/year. With the projected development plans and implementation of the proposed measures, by 2030, Ukraine will be able to completely reduce/replace the imported natural gas in the amount of up to 10 billion m³/year and become independent of it. By 2050, the volume of the reduction/replacement of natural gas may reach almost 26 billion m³/year. Substitution of natural gas with biomass and solid biofuels in heat production is one of the most cost-effective ways, especially given the current and projected high prices of natural gas in the EU, where Ukraine is currently purchasing it. In addition, Ukraine can potentially produce up to 10 billion m³ of biomethane/year, mainly from agricultural waste and residues such as manure, cereal straw, corn stalks, sunflower stalks, sugar beet pulp, molasses, corn silage, as well as municipal waste and other types of biomass. By 2050, the total production of biogas/biomethane in the country may reach 6 billion m³/year, some of which can be exported. We believe that Ukraine as soon as possible needs to develop an effective and ambitious state program to reduce and replace the consumption of imported gas, which should be the basis for the recovery of Ukraine's energy sector.

References 5, tables 3, figures 2.

Key words: renewable energy, renewable energy sources, biomass, solid biofuels, biogas, biomethane.

1. *Georgii Geletukha, Tetiana Zheliezna, Semen Drahniev, Olha Haidai.* Desyat krokiv Ukrayiny dlya vidmovy vid rosiiskogo pryrodnogo gazu. [Ten actions of Ukraine to reject russian natural gas]. Position Paper of Bioenergy Association of Ukraine № 28, April 2022. (Ukr.)

http://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/10-krokiv-Ukrayiny-dlya-vidmovy-vid-PG_UKR.pdf

2. *Share of energy* from renewable sources in heating and cooling 2020, Eurostat.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Table_3_share_of_energy_from_renewable_sources_in_heating_and_cooling_2020.PNG

3. *Energetychnyi balans* Ukrayiny za 2020 rik. [Energy balance of Ukraine, 2020]. Express issue of the State Statistics Service of Ukraine 30.11.2021. (Ukr.) <http://www.ukrstat.gov.ua/>

4. *Geletukha G., Zheliezna T.* Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050 // Ecological Engineering & Environmental Technology. – 2021, v. 22 (5), p. 73-81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>

5. *EBA Statistical Report* 2021. <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/11/EBA-STATISTICAL-REPORT-2021-SHORT-VERSION.pdf>

Отримано 20.05.2022

Received 20.05.2022

УДК 536.24: 621.45.038

РОЗВИТОК СИСТЕМ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН (ОГЛЯД)

Халатов А.А.,¹ академік НАН України, Борисов І.І.,¹ канд. техн. наук. Кулішов С.Б.²

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

² ДП НВКГ «Зоря»-Машпроект», Миколаїв, пр. Богоявленський, 42а, 54018, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.9>

Виконано аналіз тенденцій розвитку систем плівкового охолодження лопаток високотемпературних газових турбін. Розглянуті сучасні та перспективні схеми, зроблено їх порівняльний аналіз.

The analysis of trends in the development of film cooling systems for gas turbine blades is carried out. Modern and promising schemes are considered, their comparative analysis is made.

Бібл. 43, рис. 12.

Ключові слова: лопатки газових турбін, тепловий захист, плівкове охолодження, тенденції розвитку.

d – діаметр отвору вдуву;

m – параметр вдуву;

T – температура;

w – швидкість;

x – поздовжня координата;

η – адіабатна ефективність плівкового охолодження;

ϕ – глибина охолодження;

Індекси:

∞ – параметри основного потоку;

2 – параметри потоку, що вдувається;

0 – параметри для циліндричних отворів;

w – параметри на стінці.

Вступ

Газотурбобудування є наукоємною і високотехнологічною галуззю промисловості, яка базується на останніх досягненнях науки і техніки. Україна входить до числа десяти ведучих країн світу, які мають повний цикл проектування, виробництва та експлуатації газових турбін для авіації, військово-морського флоту енергетики та газотранспортної системи.

Прогрес в області газотурбобудування нерозривно пов'язаний із ростом температури газу перед турбіною. В сучасних турбінах для військової авіації вхідна температура складає 1600...1700°C, в потужних енергетичних турбінах для виробництва електричної енергії – 1450...1600°C, і в приводних газових турбінах малої потужності – 1350...1400°C. В останньому випадку більш низький рівень температури обумовлений вимогою більш високого життєвого циклу газових турбін (до 150 тис. годин) та стійкості до високотемпературної корозії. Зростання температури газу призводить до підвищення температури не тільки робочих та соплових лопаток, а і дисків, статора, опор турбіни та системи змащування підшипників. Особливо вразливими в цьому сенсі є робочі лопатки, які піддаються відцентровим навантаженням та згинальним коливанням.

Як показує аналіз, на даний час сформульовані та інтенсивно розвиваються два напрями досягнення високих температур газу перед турбіною. Перший з них пов'язаний зі створенням жароміцних та жаростійких матеріалів, а також теплозахисних та термобар'єрних покриттів лопаток. Другий напрям пов'язаний з охолодженням найбільш нагрітих елементів газової турбіни, перш за все соплових і робочих лопаток. Для охолодження використовується стиснуте повітря, яке відбирається від компресора.

Світовий досвід показує, що приріст температури газу за рахунок удосконалення систем охолодження лопаток значно вищий за приріст внаслідок використання нових матеріалів (рис. 1).

На протязі останніх 70 років прогрес в області матеріалознавства дозволив підвищувати температуру газу перед турбіною зі середнім темпом приблизно 4° на рік, в той час як розвиток систем охолодження забезпечив зростання вхідної температури на 10...11° щороку [2].

В цілому, розробка охолоджуваних лопаток високотемпературних газових турбін базується на рішенні комплексу задач в області матеріалознавства, технології виробництва та нових проектних рішень, які забезпечу-

ють високу надійність лопаток, мінімальну витрату охолоджувача, стійкість до високотемпературного окислення, повзучості, мало- та багатоциклової втоми.

На даний час плівкове охолодження, поряд із розробкою новітніх жаростійких матеріалів, застосуванням термобар'єрних покриттів та конвективним внутрішнім охолодженням, є одним з ключових складових забезпечення робочого температурного режиму лопаток газових турбін. Це призводить до інтенсивного пошуку та дослідження нових інноваційних схем зовнішнього теплового захисту.

Загальні відомості

Загальну схему плівкового охолодження наведено на рис. 2. Охолоджувач (газ, як правило, повітря) подається через щілину чи отвори, та утворює плівку, яка захищає поверхню від впливу високотемпературного основного газового потоку.

Основи теорії плівкового охолодження були сформульовані Е. Еккертом. Для визначення теплового потоку в стінку їм запропоновано використовувати два параметри – адіабатну ефективність плівкового охолодження і коефіцієнт тепловіддачі до поверхні при плівковому охолодженні. Адіабатна ефективність визначається наступним співвідношенням:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_2 - T_{\infty}} \quad (1)$$

де T_{∞} та T_2 – температури основного потоку та охолоджувача, T_{aw} – адіабатна температура поверхні (за відсутності теплообміну). В рамках цього підходу, характерною температурою для розрахунку коефіцієнту зовнішнього теплообміну є адіабатна температура поверхні.

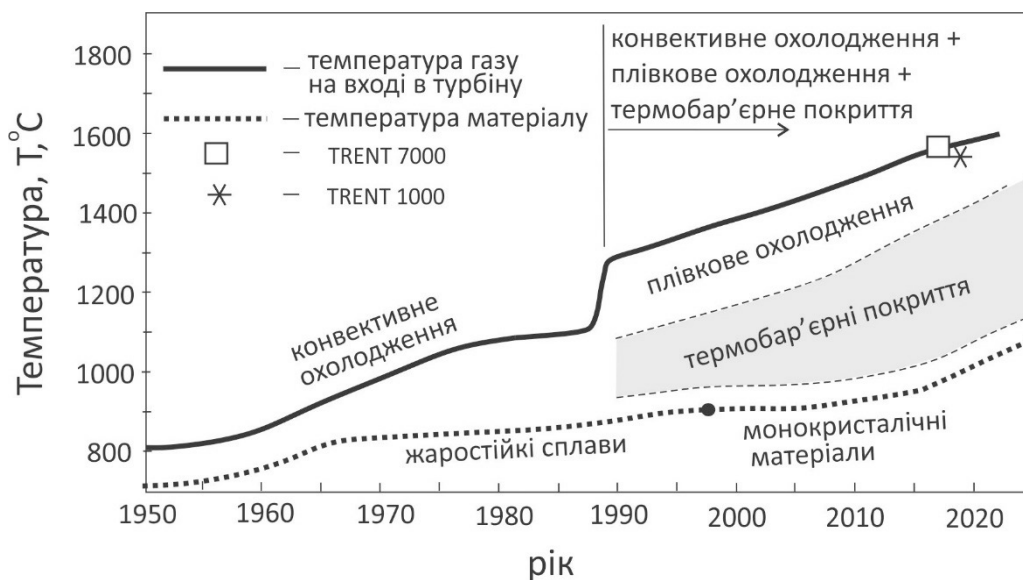


Рис. 1. Зростання температури газу на вході в турбіну та температури матеріалу лопатки по роках за даними [1]

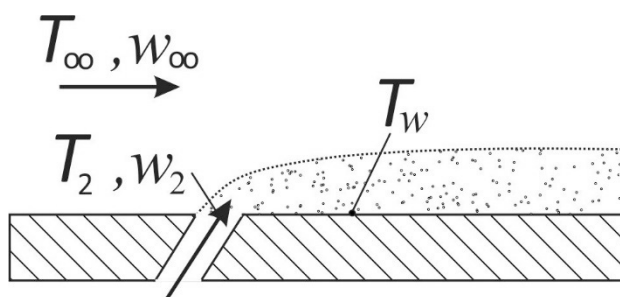


Рис. 2. Схема плівкового охолодження.

T_{∞}, w_{∞} – температура та швидкість основного потоку; T_2, w_2 – температура та швидкість охолоджувача; T_w – температура поверхні

Важливим параметром, який найбільш часто використовується дослідниками та розробниками систем плівкового охолодження, є параметр вдуву, він визначається по формулі:

$$m = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_\infty w_\infty} \quad (2)$$

де ρ_∞ , w_∞ та ρ_2 , w_2 – значення густини та швидкості основного потоку та охолоджувача.

Історичні аспекти

Фундатором застосування газової зависи є Ернст Еккерт. Дана проблема почала вивчатись з 1953 р. в Лабораторії теплообміну Університету штату Міннесота [3]. Були розвинуті основи плівкового охолодження з подачею газового охолоджувача через одиночний отвір и ряд отворів, проаналізована картина течії при взаємодії газових струй із зовнішнім потоком. Серед основних піонерських робіт можна виділити роботи [4-6], виконані Р. Гольдштейном із співробітниками. Важливою методологічною частиною досліджень плівкового охолодження, як відмічається в роботі [7], є можливість вивчення потоків з низькими температурами, з подальшим масштабуванням на високі температури. В подальшому були проведені багаточисленні дослідження, присвячені проблемам плівкового охолодження. Як відмічається в роботі [8], всього вийшло більш ніж 5000 публікацій. Насправді, скоріше за все, значно більше, якщо урахувати роботи, які вийшли в СРСР.

Піонером в області використання плівкового охолодження в лопатках газових турбін є фірма «Роллс-Ройс» (Велика Британія). В роботі [9] систематизовані основні віхи в даному напрямі. В кінці 1960-х рр. був створений новий конкурентний двигун RB211, в якому, наряду з внутрішнім конвективним, вперше застосовано плівкове охолодження поверхні робочої лопатки. Випробування RB211 закінчились в 1970 р., а в 1972 р. він був сертифікований і переданий в експлуатацію. Цей двигун виявився вельми успішним.

Спочатку для охолодження використовувались циліндричні похилі отвори, але в подальшому з'явилися інші, більш ефективні конфігурації. В роботі [8] приведена хронологія розвитку систем плівкового охолодження у вигляді їх впливу на глибину охолодження лопаток газових турбін (рис. 3). Глибина охолодження визначається співвідношенням:

$$\phi = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} \quad (3)$$

де T_w та T_c – відповідно значення температури зовнішньої поверхні лопатки та охолоджувача на вході в лопатку. Глибина охолодження лопатки залежить від внутрішнього та зовнішнього конвективного теплообміну, а також від ефективності плівкового охолодження. В роботі [10] для розрахунку глибини охолодження запропоновано безрозмірне співвідношення, отримане в рамках одновимірної моделі:



Рис. 3. Хронологія розвитку систем плівкового охолодження за даними [8]

$$\phi = \frac{1-\chi\eta}{1+Bi+\alpha_e/\alpha_i} + \chi\eta \quad (4)$$

де $\chi = (T_\infty - T_2)/(T_\infty - T_{c\text{in}})$ – фактор підігріву охолоджувача; $T_{c\text{in}}$ – температура охолоджувача на вході в лопатку; Bi – число Біо; α_e/α_i – відношення зовнішнього та внутрішнього коефіцієнтів теплообміну.

Сьогодні реальні значення глибини охолодження, які вдалося досягнути в практиці турбобудування, знаходяться на рівні 0,5...0,6. За оцінкою автора роботи [8], по мірі розвитку та удосконалення систем плівкового охолодження можна підвищити цей показник до 0,7. На даний час плівкове охолодження широко використовується на соплових і робочих лопатках першого, другого і навіть третього ступеня високотемпературних газових турбін

Схеми плівкового охолодження, які застосовуються в практиці охолодження лопаток

Вдув через ряд циліндричних отворів

Вдув повітря через ряди циліндричних отворів (перфорацію) був і поки остається способом, який найбільш широко використовується для організації

плівкового охолодження профільних і торцевих поверхонь лопаток газових турбін. На даний час в практиці застосовуються схеми подачі охолоджувача під простим і складним кутами (рис. 4). В останньому випадку проекція осі отвору на площину «xz» нахилена під кутом β до осі «x».

Для схем випуску повітря через отвори є характерним відрив струменя від поверхні (при параметрі вдуву $m > 0,7$), а також складна тривимірна картина течії, яка пов'язана з наявністю в струмені охолоджувача, що видувається, вихрових течій, які після утворення зберігаються і далі вниз по потоку (рис. 5).

Найбільш потужна вихрова структура, яка має назву ниркоподібним вихором («kidney-shaped vortex»), складається із двох вихорів протилежного обертання в ядрі струменя. Ця структура підводить гарячий газ до поверхні, що захищається, і виносить охолоджувач в основний потік. Це призводить до зниження ефективності плівкового охолодження. Тому на даний момент основні зусилля дослідників та розробників спрямовані на запобігання відриву та ослаблення вихорів, для цього використовуються різні методи, як активні, так і пасивні.

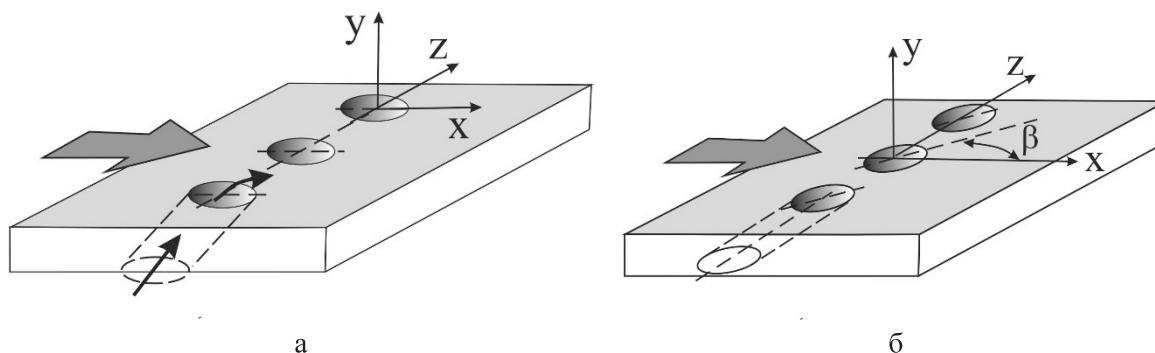


Рис. 3.2. Схеми вдуву охолоджувача через ряд циліндричних отворів під простим (а) та складним (б) кутами

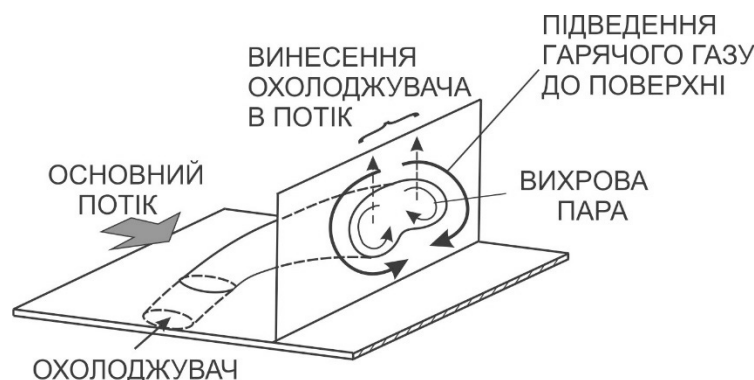


Рис. 5. Вихрова пара (kidney shaped vortex), яка утворюється при виході охолоджувача на поверхню [11]

Одним із ефективних способів підвищення ефективності плівкового охолодження і рівномірності покриття поверхні є розташування отворів під складним кутом (рис. 4 б). Воно дозволяє підвищити адіабатну ефективність у 1.5...2 рази.

Вдув через фасонні отвори

Як відмічається в огляді [12], розробка і практичне використання фасонних отворів є найбільш успішною технологією плівкового охолодження лопаток. Вона дозволяє у 2...3 рази знизити швидкість охолоджувача на виході із отвору за рахунок збільшення вихідного січення та розширення струменю у поперечному напрямі, що значно підвищує ефективність плівкового

охолодження і покращує покриття поверхні. Варіанти профільованих отворів показані на рис. 6.

Огляд [14] написаний у 2005 р., проте, незважаючи на велику кількість опублікованих робіт, які присвячені різним інноваційним методам плівкового охолодження, на даний момент фасонні отвори поки остаються єдиною практичною альтернативою циліндричним отворам.

Як відмічається в роботі [14], плівкове охолодження за допомогою фасонних отворів фундаментально відрізняється від охолодження за допомогою циліндричних отворів: для цієї системи відрив потоку не спостерігається навіть при високих значеннях параметру вдуву (до $m = 4$). В результаті багатьох експери-

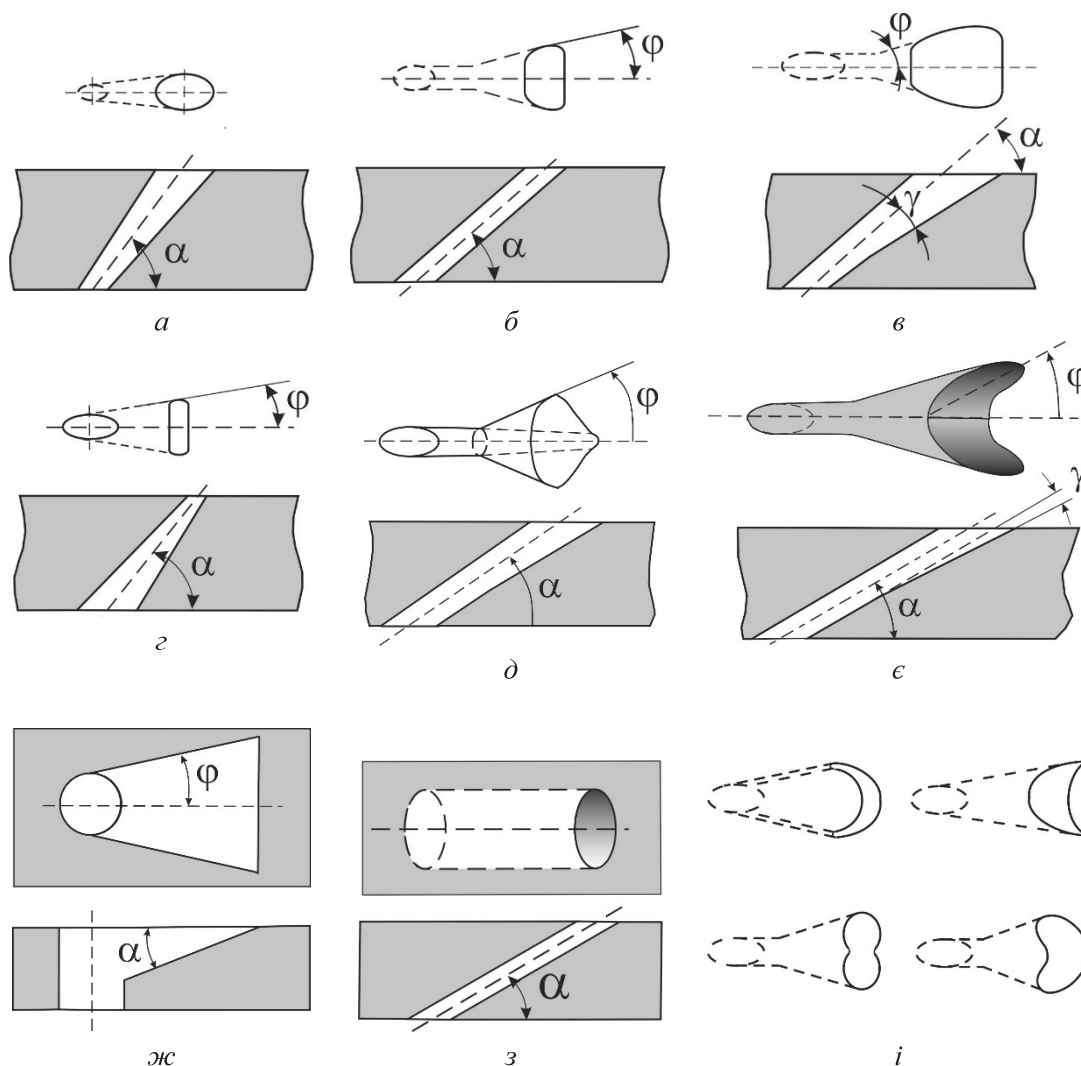


Рис. 6. Варіанти фасонних отворів: а – конічний дифузор; б – отвір віялової форми; в – віяловий отвір з розширенням у вертикальній площині; г – консольний отвір; д – отвір листоподібної форми; е – отвір НЕКОМІМІ; ж – отвір з ортогональним входом; з – овальний отвір; і – отвори у формі півмісяця, гантелі та бобу

ментальних і чисельних досліджень структури потоку і ефективності плівкового охолодження було показано, що, на відміну від циліндричних отворів, в фасонних отворах вихрова пара вже не домінує.

На думку авторів роботи [15], найкращим варіантом фасонного отвору є варіант, який названий «7-7-7», тобто віяловий отвір з вертикальним розширенням (рис. 6 в) з кутами $\varphi = \gamma = 7^\circ$.

Дослідження показали, що, на відміну від циліндричних, для фасонних отворів вплив складного кута на ефективність плівкового охолодження є незначним, і його можна не враховувати в інженерних розрахунках.

В останні два десятиліття проводяться інтенсивні експериментальні і розрахункові дослідження, спрямовані на пошук систем плівкового охолодження, які дозволяють збільшити ефективність плівкового охолодження та покращити рівномірність «покрива» поверхні охолоджувачем. В результаті запропоновано багато технічних рішень, які, у зв'язку зі складністю виготовлення, поки не знайшли практичного втілення, проте з розвитком нових технологій можуть в подальшому виявитися перспективними у найближчий час.

Для фасонних отворів основним напрямом удосконалення є покращення геометрії виходу.

В роботі [16] запропоновано використання отворів листоподібної форми (рис. 6, д). Як показали дослідження, така форма збільшує середню по поверхні ефективність плівкового охолодження у порівнянні з віяловим отвором з вертикальним розширенням на 10% при $m = 1$ та на 25% при $m = 1.5$. Вдалим технічним рішенням, дослідженим в роботі [17], виявилось застосування отворів, названих авторами «НЕКОМІМІ» (рис. 6, е), які дозволяють збільшити середню по ширині ефективність плівкового охолодження на початковій ділянці ($x/d = 5 \dots 10$) при $m = 1.5$ на 40...50% у порівнянні з віяловим отвором. Отвори з ортогональним входом охолоджувача [18], (рис. 6, ж), підвищують середню по ширині ефективність плівкового охолодження на ділянці ($x/d > 4$) при $m = 1.2$ на 80% у порівнянні з циліндричним похилим отвором. Отвори овальної форми, запропоновані в роботі [19] (рис. 6, з), збільшують середню по ширині ефективність плівкового охолодження на ділянці ($x/d > 4$) при $m = 1.2$ на 80% у порівнянні з циліндричним похилим отвором. У роботах [20-22] запропоновані екзотичні форми отворів у вигляді півмісяця, гантелі і бобу (рис. 6, і).

Вдув через отвори у заглибленнях

На даний час продовжується пошук технічних рішень, які дозволяють суттєво підвищити ефективність

систем плівкового охолодження при незначному підвищенні вартості їх виготовлення, і які призводять до зниження міцності лопаток. Деякі з таких рішень ґрунтуються на організації виходу охолоджувача в поверхневі заглиблення відносно простої геометричної форми (кратери, траншеї). Основною метою таких конструкторських рішень є максимальне подавлення «ниркоподібного» вихору за рахунок з'явлення периферійних вихрових структур, які обертаються в протилежних «ниркоподібному» вихору напрямках. Окрім цього, при вдуванні охолоджувача у заглиблення відбувається його диспергування, і в результаті – збільшення площі покриття гарячої поверхні плівкою і підвищення ефективності плівкового охолодження. Технологічно заглиблення можуть бути виконані повністю або частково в теплозахисному покритті, в цьому випадку їх наявність не вплине на міцність лопатки. Численні дослідження показали, що оптимальне відношення глибини кратера і поперечної траншеї до діаметра отвору складає величину $(0.5 \dots 0.75) d$, тобто найбільш ефективними є «мілкі» заглиблення. Варіанти отворів в заглибленнях наведені на рис. 7.

Вдування охолоджувача через отвори у циліндричних кратерах (рис. 7, а) вивчалось в роботах [23, 24]. Така схема забезпечує збільшення адіабатної ефективності на початковій ділянці на 40%...60% при значенні параметру вдуву $m = 1.0 \dots 1.5$. Запропонована в роботі [25] трикутна форма кратерів з прямою передньою стінкою (рис. 7, б) дозволяє підвищити середню по поверхні адіабатну ефективність на початковій ділянці при $m = 1.0 \dots 1.5$ в 2.2...3 рази у порівнянні з отворами без кратерів, а запропоноване у тій же роботі скривлення стінки трикутного кратера (рис. 7, в) підвищує адіабатну ефективність ще на 10%. В роботі [26] досліджувались отвори в кратерах з напівеліптичним уступом на передній стінці (рис. 7, г). Така схема вдуву дозволяє підвищити середню по поверхні адіабатну ефективність на початковій ділянці у 1.5 рази при $m = 1.0$ та у 2 рази при $m = 1.5$ у порівнянні з отворами без кратерів. Отвори в кратерах з подовженим овальним уступом на передній стінці (рис. 7, д) запропоновані в роботі [27]. Оптиміальний дизайн ($L_p/L = 0.657$) підвищує адіабатну ефективність у 2 рази при $m = 1.5$ у порівнянні з варіантом кратера з напівеліптичним уступом.

Вдалим технічним рішенням є схема вдування охолоджувача через отвори, розташовані у «мілкій» поперечній траншеї. Адіабатна ефективність для такої схеми наближається до ефективності фасонних отворів. Отвори у прямокутній траншеї (рис. 7, е)

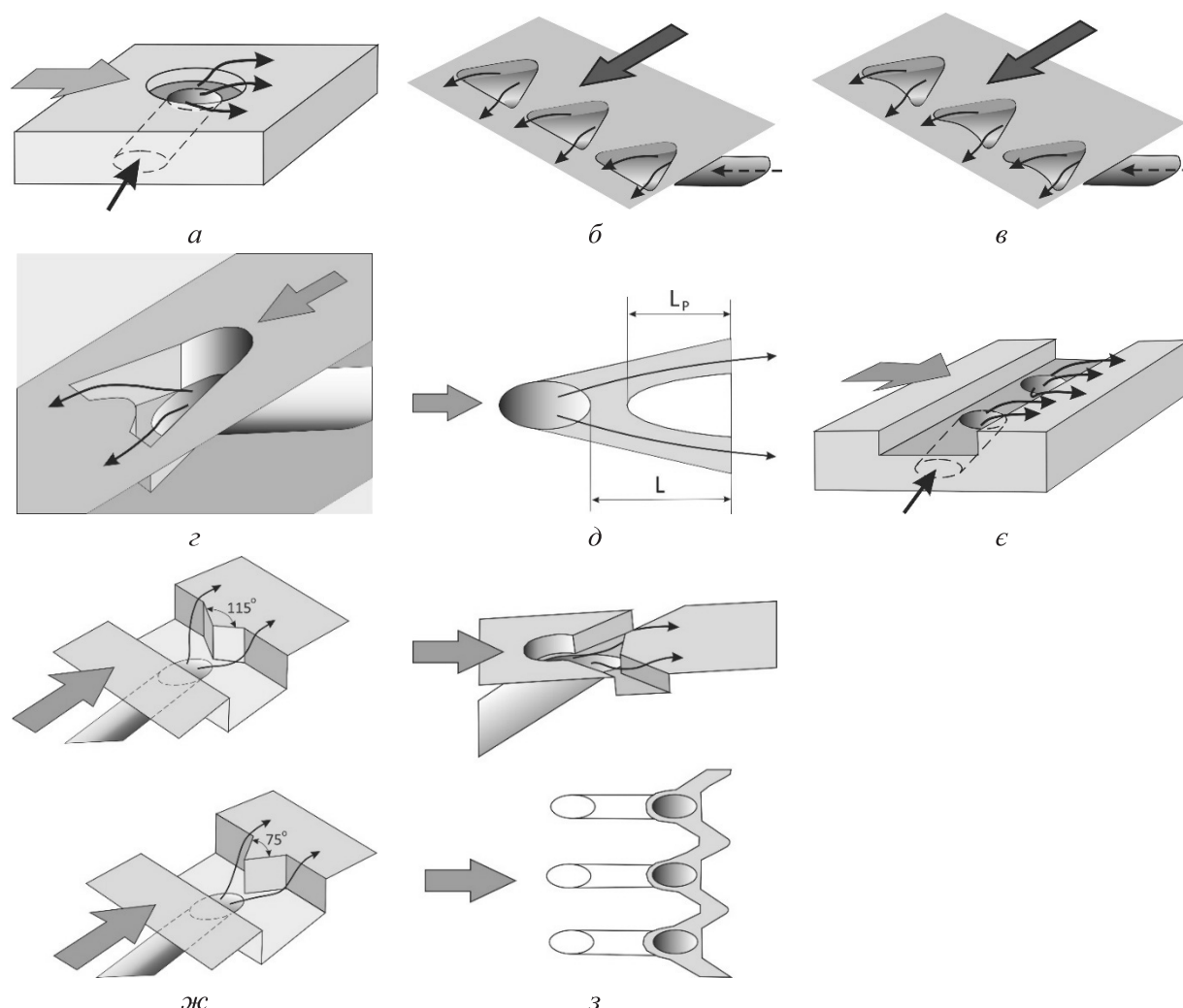


Рис. 7. Варіанти отворів у заглибленнях. а – циліндричні кратери; б – трикутні кратери; в – трикутні кратери зі скривленою передньою стінкою; г – кратери з напівеліптичним виступом на передній стінці; д – кратери з подовженим овальним уступом на передній стінці; е – прямокутна траншея; ж – прямокутна траншея з уступом трикутної форми на передній стінці; з – траншея W-подібної форми

досліджувались в роботах [24,28]. Такий варіант вдуву забезпечує підвищення середньої по ширині адиабатної ефективності на початковій ділянці при $m = 1.0 \dots 1.5$ у $2 \dots 2.5$ рази у порівнянні з отворами без траншеї.

В останні роки пропонуються модифіковані варіанти форми траншеї, які дозволяють суттєво підсилити подавлення ниркоподібного вихору і підвищити адиабатну ефективність. У роботі [29] вивчалась траншея з уступом трикутної форми на передній стінці (рис. 7, ж). Оптимальний дизайн ($\alpha = 75^\circ$) забезпечує підвищення середньої по ширині адиабатної ефективності на початковій ділянці при $m = 1.5$ у 1.7 рази у порівнянні з отворами в прямокутній траншеї. Траншея W-подібної форми (рис. 7, з), запропонована в роботі [30], підвищує

середню по ширині адиабатну ефективність на початковій ділянці при $m = 1.5$ у 1.7 рази у порівнянні з отворами в прямокутній траншеї.

Слід відмітити, що при наявності термобар'єрного покриття вплив заглиблення на глибину охолодження лопатки значно знижується [31]. Для оцінки цього впливу необхідний тепловий розрахунок лопатки з урахуванням всіх факторів. Також треба відмітити, що при аналізі глибини охолодження є необхідним індивідуальний підхід, з урахуванням теплофізичних властивостей покриття. Крім цього, нові способи плівкового охолодження забезпечують більш рівномірне покриття поверхні, що є важливим для більшої рівномірності поля температур поверхні лопатки.

Антивихрові системи отворів

Оскільки основним механізмом, який знижує ефективність плівкового охолодження при застосуванні циліндричних отворів, є парний (ніркоподібний) вихор, то проводиться пошук нових технічних рішень, спрямованих на його послаблення або подавлення за допомогою організації вихрових пар, які обертаються в протилежних напрямках. Ці рішення можна віднести до активним способам підвищення адіабатної ефективності, за рахунок впливу на ніркоподібний вихор за допомогою систем антивихрових отворів. Перевагою таких технологій є те, що вони дозволяють створювати нові схеми охолодження на наявній технологічній базі виготовлення похилих отворів. Приклади антивихрових отворів наведені на рис. 8.

Парні отвори (рис. 8, а), досліджувались в роботах [24,32]. Така схема подачі охолоджувача дозволяє збільшити адіабатну ефективність у порівнянні з традиційною дворядною системою на 40% при значенні параметру вдуву $m \leq 1$. В роботі [33] запропоновані додаткові бокові антивихрові отвори перед основним отвором (рис. 8, б). В результаті отримано збільшення середньої по ширині ефективності плівкового охолодження у 2 рази у порівнянні з традиційною схемою похилих циліндричних отворів. Розташування додаткових

антивихрових отворів на одній лінії з основним отвором (рис. 8, в), яке досліджувалося в роботі [34], дозволило збільшити середню по ширині ефективність плівкового охолодження у 2.5 рази при $m = 1.5$ у порівнянні з традиційною схемою похилих циліндричних отворів. Багатообіцяючі результати отримані в роботі [35] при застосуванні отворів-трійників (рис. 8, г). Ефективність такої схеми відповідає ефективності віялових отворів. Запропоновані в роботі [36] схеми, яку автори назвали «отвори-сестри» (рис. 8, д) дозволяють підвищити середню по ширині ефективності у 3 рази у порівнянні з похилими циліндричними отворами, що також є дуже перспективним напрямком. В роботі [37] вивчалась схема зворотного розташування отворів, але для цієї схеми підвищення ефективності плівкового охолодження не виявилось досить значним.

Слід відмітити результати недавньої експериментальної роботи [38], згідно яких при збільшенні параметра відношення щільностей $DR = \rho_c / \rho_\infty$ от 1,0 до 2.5 ефективність плівкового охолодження двоструменевої схеми підвищується у 2 рази. Також збільшується і рівномірність, тобто при реальних умовах дана схема може показати хороші результати. За даними тієї ж роботи, для фасонних отворів збільшення DR не призводить до збільшення ефективності.

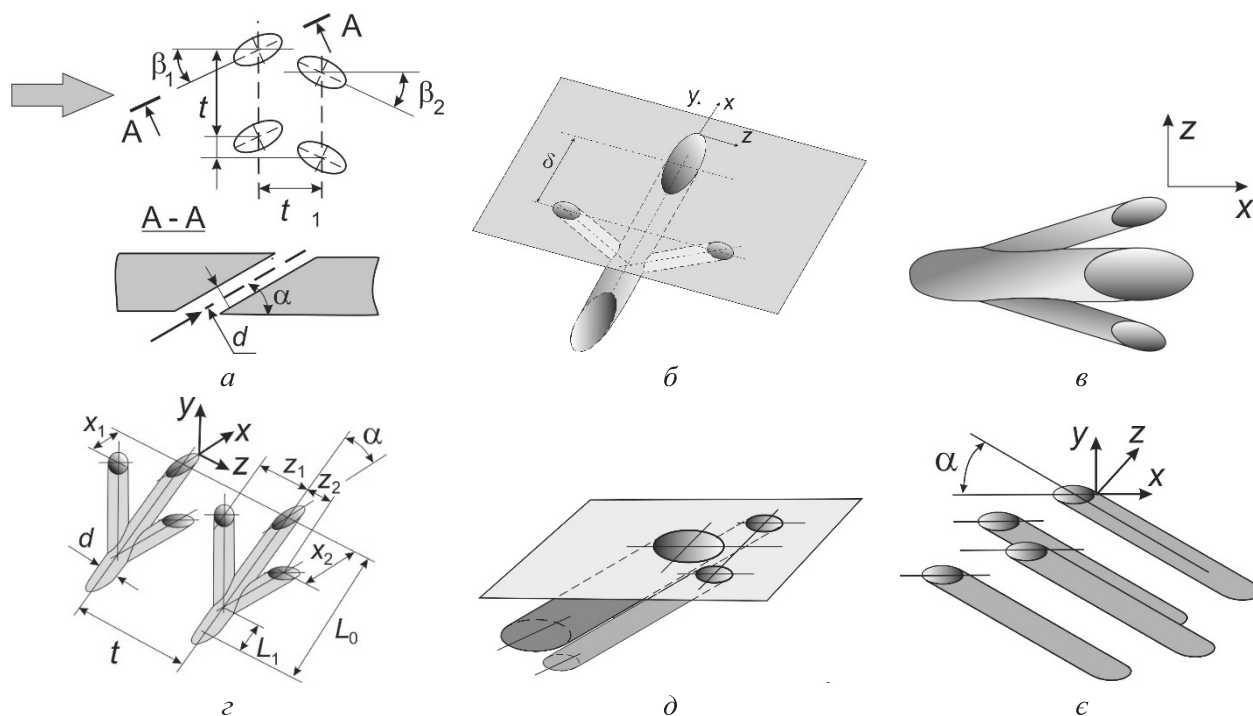


Рис. 7. Варіанти антивихрових отворів. а – парні отвори; б – додаткові бокові антивихрові отвори перед основним отвором; в – додаткові антивихрові отвори на одній лінії з основним отвором; г – отвори-трійники; д – отвори-сестри; е – зворотні отвори

Обтічний уступ перед отвором вдуву

Уступ відділяє отвір вдуву від основного потоку (рис. 8).

Перед отвором створюється зона відриву, що знижує тиск та зменшує гідравлічні втрати. При цьому покращується поперечне розподілення охолоджувача. За даними роботи [39] середня по ширині адіабатна ефективність при $x/d = 5$ підвищується у 2 рази у порівнянні з базовим варіантом циліндричного отвору. Хоча втрати в отворі знижуються, загальні втрати підвищуються внаслідок відриву потоку. Важливим фактором є кут уступу і його форма. Також впливає положення отвору по відношенню до уступу. Якщо отвір занадто далеко від уступу, він може опинитися в зоні приєднання потоку, що є небажаним.

В недавніх публікаціях досліджується варіант уступу у вигляді «бархана». В [40] показано, що в даному випадку виникають антивихрові структури (рис. 9), а ефективність плівкового охолодження на початковій ділянці ($x/d = 5$) при значенні параметра вдува $m = 1.25$ підвищується у 2.5 рази у порівнянні з базовим варіантом циліндричного отвору.

В роботі [41] запропонована комбінація уступу в формі «бархана» і додаткової пари антивихрових (отвори–«сестри») отворів (рис. 10).

Така схема збільшує середню по ширині адіабатну ефективність у порівнянні з варіантом «бархана» без отворів – «сестер» на ділянці вдуву $10 < x/d < 25$: на 80% при $m = 1$ і на 60% при $m = 1.5$.

Порівняння різних схем плівкового охолодження

На рис. 11 приведено порівняння різних схем плівкового охолодження у вигляді відношення середніх по ширині адіабатних ефективностей системи, що розглядається, і аналогічної їй по геометрії системи циліндричних похилих отворів. Порівняння приведено для двох значень параметра вдуву: $m = 1$ та $m = 1.5$.

Серед розглянутих варіантів плівкового охолодження найбільш високу ефективність мають фасонні отвори з вертикальним розширенням. Дещо поступаються їм отвори віялового типу і антивихрові отвори – група цих трьох схем розташована вище за решту. Другу групу утворюють траншейна схема, інноваційні кратерні схеми та схема з уступом перед отвором у формі «бархана». В цій групі траншейна схема має перевагу, В третю групу

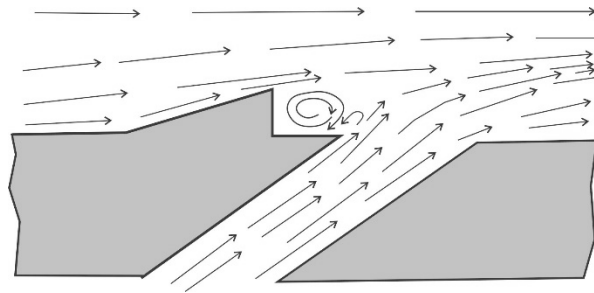


Рис. 8 Лінії току для отвору з обтічним уступом за даними роботи [39]

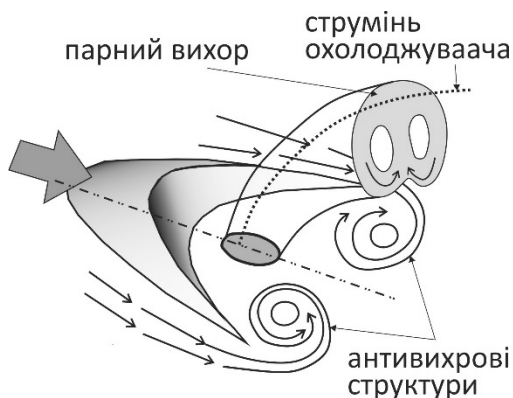


Рис. 9. Вихрові структури, які утворюються після обтікання перепони в формі «бархана» [40]

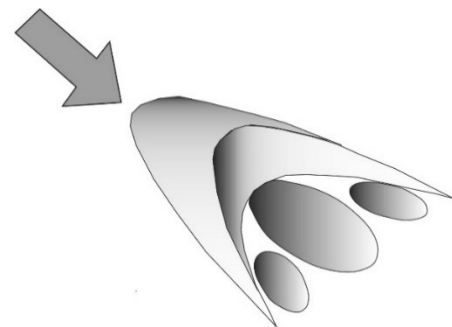


Рис. 10. Комбінація уступу в формі «бархана» і отворів – «сестер» [41]

входять варіанти із циліндричними отворами під складним кутом та циліндричними кратерами, вони дещо поступаються по ефективності іншим інноваційним схемам.

Умови подачі охолоджувача в канал плівкового охолодження

Більшість досліджень виконана з подачею охолоджувача із великого об'єму, що забезпечує приблизно рівномірний профіль швидкості повітря на вході в отвір охолодження. В реальних умовах напрям течії охолоджувача всередині лопатки може бути різним по відношенню до осі отвору і суттєво впливати на коефіцієнт витрати і ефективність плівкового охолодження через різний профіль швидкості охолоджувача

и утворенні відривних зон. Тому впливу умов входу охолоджувача в отвір вдуву в останні роки приділялася значна увага дослідників.

Так, в роботі [42] для отворів в кратерах з напівеліптичним уступом на передній стінці (рис. 7, з) виконано комп'ютерне моделювання плівкового охолодження для трьох варіантів розташування отвору по відношенню до осі внутрішнього каналу: прямотечія, перехресна течія та протитечія (рис. 12).

Діапазон параметру вдуву складав 0.5...2.0. Дослідження показали, що при всіх схемах подачі охолоджувача за похилим циліндричним отвором був чітко видний «ниркоподібний» (парний) вихор, причому для перехресної подачі цей вихор є похилим внаслідок за-

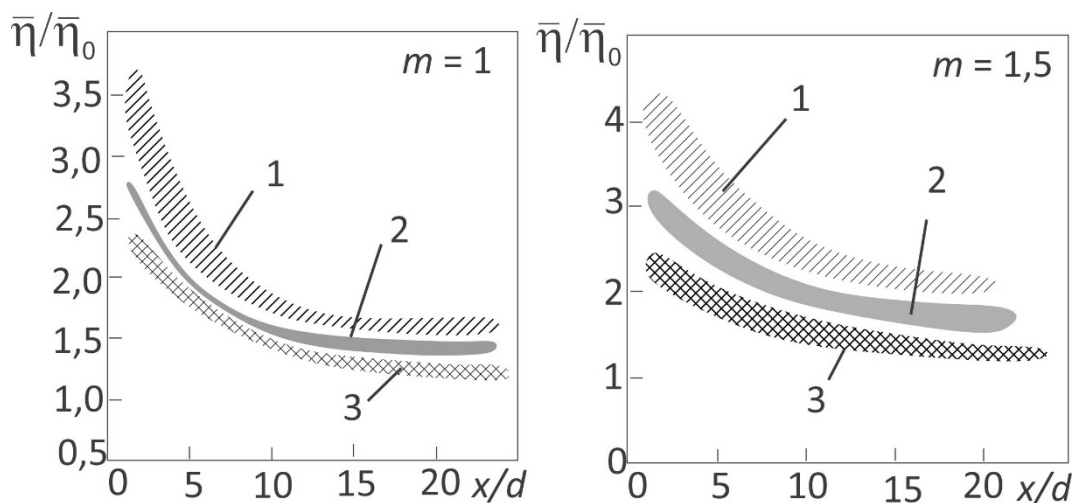


Рис. 11. Порівняння різних схем плівкового охолодження у вигляді відношення середніх по ширині адіабатних ефективностей системи, що розглядається, і аналогічної їй по геометрії системи циліндричних похилих отворів. 1 – фасонні отвори та антивихрові системи; 2 – траншейна схема, інноваційні кратерні схеми та схема з уступом перед отвором у формі «бархана». 3 – циліндричні отвори під складним кутом та циліндричні кратери

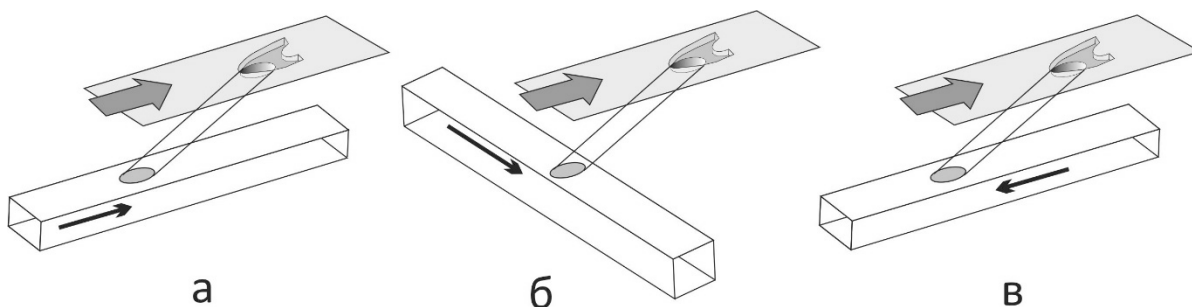


Рис. 12. Варіанти розташування отвору вдуву по відношенню до внутрішнього каналу, досліджені в [42]: а, б, в – прямотечія, перехресна течія та протитечія

крутки потоку в каналі охолодження. Подача охолоджувача в кратер з напівеліптичним уступом суттєво знижує розмір «ниркоподібного» вихору або змінює його структуру. В каналі охолодження формується закручена течія, що далі призводить до взаємодії закрученого потоку з напівеліптичним уступом, перетворенню «підковоподібного» вихору і покращенню умов плівкового охолодження. При малих ($m = 0.5$) і великих ($m = 1.5$ і 2.0) параметрах вдува подача охолоджувача в кратер з напівеліптичним уступом має значну перевагу перед іншими способами подачі охолоджувача. Це, головним чином, пов'язано з руйнацією «підковоподібного» вихора.

В роботі [43] досліджений вплив згладжування вхідного отвору і спеціального фасонного входу на ефективність плівкового охолодження при вдуві через фасонний отвір з вертикальним розширенням (форма фасонного отвору 7-7, що згадувалась раніше). Розглядалася перехресна течія у внутрішньому каналі по відношенню до отвору вдуву. Показано, що згладжування отвору, а також спеціально виконаний фасонний вхід підвищують усереднену по поверхні ефективність охолодження на 50% при значенні параметра відношення швидкостей $VR = 1.1$, причому обидва варіанти дають приблизно однакові результати.

Ефузійне охолодження

Ефузійне охолодження – наступний крок в розвитку плівкового охолодження лопаток газових турбін. В даному способі охолодження використовується багаторядна (7 і більше рядів) система отворів невеликого (0.2 мм) діаметра. На відміну від традиційного плівкового охолодження за допомогою рядів отворів, при ефузійному охолодженні струмені взаємодіють один з іншим, і внаслідок слабкого імпульсу кожного окремого струменя вони не проникають в потік, а залишаються в пограничному шарі. Вихори приєднуються до поверхні, і в результаті збільшується ефективність плівкового охолодження. Окрім цього, потік охолоджувача через отвори призводить до конвективного охолодження, потенціал якого значно краще використовується в більш щільно розташованих ефузійних системах, ніж при традиційному плівковому охолодженні.

Незважаючи на те, що ефузійне охолодження досліджується на протязі 60-ти останніх років, воно поки не знайшло комерційного застосування внаслідок ряду технологічних та інших обмежень. Тим не менш, можна стверджувати, що наукова база даного метода достатньо добре відпрацьована, і з розвитком нових технологій ефузійне охолодження може знайти практичне використання в найближчий час.

Висновки

Виконано аналіз тенденцій розвитку систем плівкового охолодження лопаток високотемпературних газових турбін. Розглянуті сучасні та перспективні схеми, зроблено їх порівняльний аналіз. Показано, що основним напрямом розвитку систем охолодження є розробка і удосконалення фасонних та антивихрових отворів, а також подача охолоджувача в заглибини різної форми.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Rao A. Advanced Brayton cycles. In: Gas Turbine Handbook. Chapter 1.3.2, p.115-121. URL: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/1-3-2.pdf>.
2. James P. Downs, Kenneth K. Landis. 2009, Turbine cooling systems design – past, presents and future. ASME Turbo Expo 2009. GT2009-59991. 10 p.
3. Eckert, E.R.G. Gas-to-gas film cooling. 1970. J. of Engineering Physics 19, 1091–1101.
4. Goldstein R.J., Eckert E.R., Ramsey J.W. Film Cooling with Injection Through a Circular Bole. Rep. HTL-TR-82, Minnesota Univ. (NASACR-546041), May 14, 1968.
5. Goldstein R.J., Eckert E.R., Eriksen V.L., Ramsey J.W. Film Cooling Following Injection Through Inclined Circular Tubes. Rep. HTL-TR-91, Minnesota Univ. (NASA CR-72612), Nov. 1969.
6. Ramsey J. W., Goldstein, R. J. Interaction of a Heated Jet -with a Deflecting Stream. Rep. HTL-TR-92, Minnesota Univ. (NASA CR-72613), Apr. 1970.
7. NASA Turbine Cooling Research Status Report TMX-2384. 1971, by John N. B. Livingood, Herman H., Ellerbrock, and Albert Kaufman, Lewis Research Center, 83 p.
8. Bunker R.S. Evolution of turbine cooling. (2017). ASME Paper No GT2017-63205.
9. Li Xu, Sun Bo, You Hongde, Wang Lei Evolution of Rolls-Royce air-cooled turbine blades and feature analysis Procedia Engineering 99. 2015. 1482 – 1491.
10. Albert, J. E., and Bogard, D. G., 2013, “Measurements of adiabatic film and overall cooling effectiveness on a turbine vane pressure side with a trench,” ASME J. Turbomach., 135(5), p. 051007.
11. Heidmann J.D. A numerical study of anti-vortex film cooling designs at high blowing ratio. Proceedings of ASME Turbo Expo–2008. – GT2008-50845. – 11 p.
12. Bunker R. Gas turbine: moving from macro to micro cooling. 2013. ASME Turbo Expo 2013. GT2013-94277. 17 p.
13. Bunker R.S. A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology. ASME Journal of Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127. – pp. 441–453.

14. Colban W., Thole W., D. Bogard D. A film cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface. (2011) J. of Turbomachinery, V. 133, №1. 011002.
15. Town J., Straub D., Black J., Thole K.A., Shih T. State-of-the-Art Cooling Technology for a Turbine Rotor Blade. J. of Turbomachinery 140(7), (2018), 071007-1.
16. Lee K.-D., Kim S.-N., K.-Y. Kim K.-Y. (2012) Numerical analysis of film cooling performance and optimization for a novel shaped film-cooling hole. ASME Paper GT2012-68529.
17. Kusterer K., Elyas A., Sugimoto T., Tanaka R., Kazari M., Bohn D. 2011. The NEKOMIMI cooling technology: cooling holes with ears for high-efficient film cooling. ASME Paper GT2011-45524.
18. Abraham S., Navin A.R., Ekkad S.V. Film cooling study of novel orthogonal entrance and shaped exit hole (2009) ASME Paper GT2009-60003.
19. Issakhanian E.S., Elkins C.J., J.K. Eaton J.K. 2015. Film cooling effectiveness improvements using NON-diffusing oval hole. ASME Paper GT2015-42243
20. Lu Y. Effect of hole configuration on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades (2007). PhD Thesis, Louisiana State University. – 2007. – 109 p.
21. Pat. US Bell-shaped fan cooling holes for turbine airfoil. Lee C.-P. No 7 374 401, 20.05.2008, filed on 01.05.2005. – 14 p
22. Liu J.S. et al. Enhanced film cooling effectiveness with new shaped holes (2010) ASME Paper GT2010-22774.
23. Lu Y., Dhungel A., S.V. Ekkad S.V., Bunker R.S. 2009. Film cooling measurements for cratered cylindrical inclined holes. J. of Turbomachinery. 131(1), 011005.
24. Khalatov A.A., Borisov I.I., Dashevskyy Y.Y., Reznik S.B. Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields. V. 10. Advanced film cooling schemes. – Kyiv: Politehnika – 2016. – 238 p. (Rus)
25. Khalatov A., Shi-Ju E., Wang D., Borisov I. 2020. Film cooling evaluation of a single array of triangular craters. Int. J. of Heat and Mass Transfer. V. 159. 120055.
26. Fu J.L., Bai L.C., Zhang C., Ju P.C. 2019. Film cooling performance for cylindrical holes embedded in contoured craters: effect of the crater depth. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 60(6). 1068–1076.
27. Bai L.C., Zhang C., Tong Z.T., Ju P.F. Optimization of geometric parameters of cylindrical film cooling hole with contoured craters to enhance film-cooling effectiveness– in press.
28. Lu Y., Dhungel A., Ekkad V., Bunker R.S. 2009. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches J. of Turbomachinery. 131(1), 011003.
29. Boualem A., Grine M., Azzi A. Numerical investigation of V-shaped trench on film cooling performance – in press.
30. Wu X., Du X., Chunhua Wang C. 2021. Study on Film Cooling Performance of Round Hole Embedded in Different Shaped Craters and Trenches Aerospace. 8(147).
31. Davidson F.D., Kistenmacher D., Bogard D. Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches // ASME paper GT2012-70029
32. Kusterer K., Bohn D., Sugimoto T., Tanaka R. Double-jet ejection of cooling air for improved film cooling (2006) ASME Paper GT2006-90854.
33. Heidmann J.D., Ekkad S.V. A Novel Anti-vortex turbine film cooling holes concept (2007) ASME Paper GT2007-27528.
34. Dhungel A., Lu Y., Phillips W., Heidmann J.D., Ekkad S.V. Film cooling from a row of holes supplemented with anti-vortex holes (2007) ASME Paper GT2007-27419.
35. Chi Z., Han C., Li X., Ren J., H. Jiang H. Geometrical optimization and experimental validation of a tripod film cooling hole with asymmetric side holes (2014) ASME Paper GT2014-25211.
36. Ely M.J., Jurban B.A. A Parametric study on the effect of sister hole location on active film cooling flow control. Proceedings of ASME Turbo Expo–2010. – GT2010-22060. – 11 p.
37. Park S., Jung E. Y., Kim S.H., Sohn H.-S., Cho H.H. Enhancement of film cooling effectiveness using backward injection holes. Proceedings of ASME Turbo Expo–2015. – GT2015-43853. – 9 p.
38. Jiaxu Yao, Jin Xu, Ke Zhang, Jiang Lei, Wright L.M. Effect of density ratio on film-cooling effectiveness distribution and its uniformity for several hole geometries on a flat plate. 2019. Journal of Turbomachinery, Vol. 141. 051008-1.
39. Na S., Shih T.P. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp. J. Heat Transfer 2007;129(4):464–71.
40. Zhou W., Hu H. Improvements of film cooling effectiveness by using barchan dune shaped ramps. 2016. Int. J. Heat Mass Transfer, 103, 443–56
41. Grine M., Boualem Kh., Dellil A.Z., Azzi A. 2020. Improving adiabatic film-cooling effectiveness spanwise and lateral directions by combining BDSR and anti-vortex designs. Thermophysics and Aeromechanics, 27(5), 751–760.
42. Zhang C., Bai L., Tong Z., Khalatov A. 2021. Film cooling performance for the cratered film-cooling holes with various coolant crossflow orientations. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. DOI: 10.1080/10407782.2021.1969801.
43. Jones F.B., Fox D.W., Bogard D.V. Experimental and computational investigation of shaped film cooling holes designed to minimize inlet separation. ASME Paper GT2020-15561.

DEVELOPMENT OF TURBINE BLADE FILM COOLING SYSTEMS (the review)

Khalatov A.A.¹, Borisov I.I.¹, Kulishov S.B.²

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

²*Industrial Machinery Manufacturing «Zorya-Mashproekt», Mykolayiv, 42a Bogoyavlensky av, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.9>

The analysis of trends in the development of film cooling systems for gas turbine blades is carried out. The historical aspects and chronology of the development of film cooling technologies are presented. Modern and promising schemes are considered, their comparative analysis is made. It is shown that the main way of the improvement of cooling systems is the use of shaped and anti-vortex openings, as well as the supply of coolant into recesses of various shapes. The effect of the conditions of coolant entry into the blowing hole from the internal channel is analyzed.

References 43, figures. 12.

Key words: gas turbine blades, thermal protection, film cooling, development trends.

1. Rao A. Advanced Brayton cycles. In: Gas Turbine Handbook. Chapter 1.3.2, p.115-121. URL: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/1-3-2.pdf>.
2. James P. Downs, Kenneth K. Landis. 2009, Turbine cooling systems design – past, presents and future. ASME Turbo Expo 2009. GT2009-59991. 10 p.
3. Eckert, E.R.G. Gas-to-gas film cooling. 1970. J. of Engineering Physics 19, 1091–1101.
4. Goldstein R.J., Eckert E.R., Ramsey J.W. Film Cooling with Injection Through a Circular Bole. Rep. HTL-TR-82, Minnesota Univ. (NASACR-546041), May 14, 1968.
5. Goldstein R.J., Eckert E.R., Eriksen V.L., Ramsey J.W. Film Cooling Following Injection Through Inclined Circular Tubes. Rep. HTL-TR-91, Minnesota Univ. (NASA CR-72612), Nov. 1969.
6. Ramsey J. W., Goldstein, R. J. Interaction of a Heated Jet -with aDeflecting Stream. Rep. HTL-TR-92, Minnesota Univ. (NASA CR-72613), Apr. 1970.
7. NASA Turbine Cooling Research Status Report TMX-2384. 1971, by JohnN. B. Livingood, HermanH., Ellerbrock, and Albert Kaufman, Lewis Research Center, 83 p.
8. Bunker R.S. Evolution of turbine cooling. (2017). ASME Paper No GT2017-63205.

9. Li Xu, Sun Bo, You Hongde, Wang Lei Evolution of Rolls-Royce air-cooled turbine blades and feature analysis Procedia Engineering 99. 2015. 1482 – 1491.
10. Albert, J. E., and Bogard, D. G., 2013, “Measurements of adiabatic film and overall cooling effectiveness on a turbine vane pressure side with a trench,” ASME J. Turbomach., 135(5), p. 051007.
11. Heidmann J.D. A numerical study of anti-vortex film cooling designs at high blowing ratio. Proceedings of ASME Turbo Expo–2008. – GT2008-50845. – 11 p.
12. Bunker R. Gas turbine: moving from macro to micro cooling. 2013. ASME Turbo Expo 2013. GT2013-94277. 17 p.
13. Bunker R.S. A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology. ASME Journal of Heat Transfer.– 2005. – Vol. 127. – pp. 441–453.
14. Colban W. Thole W., D. Bogard D. A film cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface. (2011) J. of Turbomachinery, V. 133, №1. 011002.
15. Town J., Straub D, Black J, Thole K.A, Shih T. State-of-the-Art Cooling Technology for a Turbine Rotor Blade. J. of Turbomachinery 140(7), (2018), 071007-1.
16. Lee K-D., Kim S-N., K-Y. Kim K-Y. (2012) Numerical analysis of film cooling performance and optimization for a novel shaped film-cooling hole. ASME Paper GT2012-68529.
17. Kusterer K., Elyas A., Sugimoto T., Tanaka R., Kazari M., Bohn D. 2011. The NEKOMIMI cooling technology: cooling holes with ears for high-efficient film cooling. ASME Paper GT2011-45524.
18. Abraham S., Navin A.R., Ekkad S.V. Film cooling study of novel orthogonal entrance and shaped exit hole (2009) ASME Paper GT2009-60003.
19. Issakhanian E.S., Elkins C.J., J.K. Eaton J.K. 2015. Film cooling effectiveness improvements using NON-diffusing oval hole. ASME Paper GT2015-42243
20. Lu Y. Effect of hole configuration on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades (2007). PhD Thesis, Louisiana State University. – 2007.– 109 p.
21. Pat.US Bell-shaped fan cooling holes for turbine airfoil. Lee C.-P. No 7 374 401, 20.05.2008, filed on 01.05.2005. – 14 p
22. Liu J.S. et al. Enhanced film cooling effectiveness with new shaped holes (2010) ASME Paper GT2010-22774.
23. Lu Y. Dhungel A., S.V. Ekkad S.V., Bunker R.S. 2009. Film cooling measurements for cratered cylindrical inclined holes. J. of Turbomachinery. 131(1), 011005.
24. Khalatov A.A., Borisov I.I., Dashevskyy Y.Y., Reznik S.B. Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields. V. 10. Advanced film cooling schemes. – Kyiv: Politehnika– 2016. – 238 p. (Rus)

25. Khalatov A., Shi-Ju E., Wang D., Borisov I. 2020. Film cooling evaluation of a single array of triangular craters. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. V. 159. 120055.
26. Fu J.L., Bai L.C., Zhang C., Ju P.C. 2019. Film cooling performance for cylindrical holes embedded in contoured craters: effect of the crater depth. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 60(6). 1068–1076.
27. Bai L.C., Zhang C., Tong Z.T., Ju P.F. Optimization of geometric parameters of cylindrical film cooling hole with contoured craters to enhance film-cooling effectiveness – in press.
28. Lu Y., Dhungel A., Ekkad V., Bunker R.S. 2009. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches. *J. of Turbomachinery*. 131(1), 011003.
29. Boualema A., Grine M., Azzi A. Numerical investigation of V-shaped trench on film cooling performance – in press.
30. Wu X., Du X., Chunhua Wang C. 2021. Study on Film Cooling Performance of Round Hole Embedded in Different Shaped Craters and Trenches *Aerospace*. 8(147).
31. Davidson F.D., Kistenmacher D., Bogard D. Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches // ASME paper GT2012-70029
32. Kusterer K., Bohn D., Sugimoto T., Tanaka R. Double-jet ejection of cooling air for improved film cooling (2006) ASME Paper GT2006-90854.
33. Heidmann J.D., Ekkad S.V. A Novel Anti-vortex turbine film cooling holes concept (2007) ASME Paper GT2007-27528.
34. Dhungel A., Lu, Y., Phillips W., Heidmann J.D., Ekkad S.V. Film cooling from a row of holes supplemented with anti-vortex holes (2007) ASME Paper GT2007-27419.
35. Chi Z., Han C., Li X., Ren J., H. Jiang H. Geometrical optimization and experimental validation of a tripod film cooling hole with asymmetric side holes (2014) ASME Paper GT2014-25211.
36. Ely M.J., Jurban B.A. A Parametric study on the effect of sister hole location on active film cooling flow control. *Proceedings of ASME Turbo Expo–2010*. – GT2010-22060. – 11 p.
37. Park S., Jung E. Y., Kim S.H., Sohn H-S., Cho H.H. Enhancement of film cooling effectiveness using backward injection holes. *Proceedings of ASME Turbo Expo–2015*. – GT2015-43853. – 9 p.
38. Jiaxu Yao, Jin Xu, Ke Zhang, Jiang Lei, Wright L.M. Effect of density ratio on film-cooling effectiveness distribution and its uniformity for several hole geometries on a flat plate. 2019. *Journal of Turbomachinery*, Vol. 141. 051008-1.
39. Na S, Shih T.P. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp. *J. Heat Transfer* 2007;129(4):464–71.
40. Zhou W, Hu H. Improvements of film cooling effectiveness by using barchan dune shaped ramps. 2016. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 103, 443–56
41. Grine M., Boualema Kh., Dellil A.Z., Azzi A. 2020. Improving adiabatic film-cooling effectiveness spanwise and lateral directions by combining BDSR and anti-vortex designs. *Thermophysics and Aeromechanics*, 27(5), 751–760.
42. Zhang C., Bai L., Tong Z., Khalatov A. 2021. Film cooling performance for the cratered film-cooling holes with various coolant crossflow orientations. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. DOI: 10.1080/10407782.2021.1969801.
43. Jones F.B., Fox D.W., Bogard D.V. Experimental and computational investigation of shaped film cooling holes designed to minimize inlet separation. ASME Paper GT2020-15561.

Отримано 22.03.2022
Received 22.03.2022

УДК 536.24:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Фіалко Н.М., член-кореспондент НАН України, **Навродська Р.О.**, канд. техн. наук, **Шевчук С.І.**, канд. техн. наук, **Пресіч Г.О.**, канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.10>

Для опалювальних котельних установок наводяться нові схемні рішення систем утилізації теплоти відхідних газів, призначені для нагрівання теплоносіїв різних температурних потенціалів. Виконано аналіз основних характеристик даних систем та обґрунтовано вибір їх раціональної конфігурації.

For heating boiler plants, new schematic solutions for heat re-cover systems of exhaust gases designed to heating heat-transfer agents of various temperature potentials are given. The analysis of these systems main characteristics is carried out and the choice of their rational configuration is justified.

Бібл. 14, табл. 1, рис. 3

Ключові слова: газоспоживальні котельні установки, відхідні гази, системи теплоутилізації, різні теплоносії, ефективність.

G – витрата, кг/с;
 Q – теплопродуктивність, кВт;
 t – температура, °С;
 X – вологовміст газів, кг/кг с.г.;
 $\Delta\eta$ – приріст ККД, КВТП

Індекси:

в – вода;
 vx – вхід;
 г – гази;
 конд – конденсат;
 нс – навколишнє середовище;
 р – роса;
 сух – сухий;

Скорочення:

ВП – водопідігрівач;
 ВП ХВО – підігрівач води на хімоводоочищення;
 ГП – газопідігрівач;
 Д – димова труба;
 ДПН – додатковий повітрянагрівач;
 К – котел;
 КВТП – коефіцієнта використання теплоти палива;
 ККД – коефіцієнт корисної дії;
 ПН – повітрянагрівач;
 Nu – число Нусельта;
 Re – число Рейнольдса.

Вступ

Дефіцит власних ресурсів природного газу в Україні та значне зростання вартості придбаного газу, спонукає до пошуку ефективних заходів щодо розроблення та впровадження новітніх енергоощадних технологій для енергетичних установок. Ефективність цих технологій, зокрема для газоспоживальних котельних установок, визначається глибиною охолодження вихідних газів, а саме, рівнем зниження їхньої температури перед надходженням до димової труби. При зниженні цієї температури нижче точки роси водяної пари, що міститься в газах, відбувається конденсація частини пари і використання її теплоти конденсації. Рівень зниження температури залежить від характеристик застосовуваних теплоносіїв для використання утилізованої теплоти та раціонального компонування в теплоутилізаційних системах відповідного теплообмінного устаткування.

Дана робота присвячена розробленню і дослідженню для газоспоживальних котельних установок новітніх теплоутилізаційних систем підвищеної теплової ефективності з поглибленим охолодженням вихідних газів.

Створенню теплоутилізаційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання палива в котельній практиці, приділяється значна увага [1–10]. Сучасні газоспоживальні котли мають в номінальному режимі ККД 92...94% при розрахунку за нижчою теплою згоряння палива. Даний ККД відповідає температурі відхідних димових газів 140 – 180 °С. Однак, завдяки тенденції енергозбереження в Україні і за її межами спостерігається намагання зниження цієї температури шляхом теплоутилізації димових газів. Найбільш розповсюджена схема теплоутилізації стосується попереднього підігрівання зворотної тепломережної води перед над-

ходженням її до котла. Це здійснюється або в окремому теплоутилізаторі – приставці до котла, або в спеціальній (конденсаційній) частині котла, агрегатованій в його корпус [1–5]. Така схема теплоутилізації не забезпечує охолодження димових газів нижче точки роси водяної пари протягом усього опалювального періоду через високу температуру зворотної води в деяких режимах роботи котла. Для підвищення ефективності використання палива в комунальних котлах розроблено комбіновані теплоутилізаційні системи. [6–10]. В цих системах після вказаного водогрійного теплоутилізатора встановлюються теплоутилізатори для нагрівання інших теплоносіїв, в яких існує потреба в котельнях і які мають нижчий рівень початкової температури, ніж зворотна вода. Такими теплоносіями слугують: дуттьове повітря та холодна вода, що надходить на хімоводоочищення. Як відомо, для забезпечення ефективного охолодження димових газів теплообмінники-утилізатори необхідно розташовувати за ходом димових газів у послідовності зменшення початкової температури нагріваного теплоносія. Однак, температури застосовуваних теплоносіїв протягом опалювального періоду змінюються в широких межах і вказаний підхід неможливо дотримати у всіх режимах експлуатації котла.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності використання теплоти палива (КВТП) газоспоживальних опалювальних котельних установок шляхом застосування новітніх теплоутилізаційних технологій з нагріванням теплоносіїв різного призначення.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- розробити можливі варіанти комбінованих теплоутилізаційних систем котельних установок з використанням утилізованої теплоти для нагрівання зворотної тепломережної води, холодної води на ХВО та дуттьового повітря та з використанням теплових методів захисту газовідвідних трактив;
- виконати дослідження теплової ефективності розроблених варіантів за такими показниками як: теплопродуктивність, приріст ККД та коефіцієнта використання теплоти палива КВТП котла, а також обсяг утвореного конденсату в різних режимах експлуатації котла протягом опалювального періоду;
- виконати порівняльний аналіз запропонованих варіантів теплоутилізаційних систем опалювального котла та обґрунтувати вибір раціонального з них.

Методика проведення досліджень.

Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувались відомі

методи теплового розрахунку котельних установок [11] та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [12].

Так, розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від димових газів при глибокому їх охолодженні здійснювався з використанням числа Nu_{Γ} у вигляді двох складових:

$$Nu_{\Gamma} = Nu_{\Gamma}^{сух} + Nu_{\Gamma}^{конд}, \quad (1)$$

де $Nu_{\Gamma}^{сух}$ – число Нусельта при так названому “сухому теплообміні”, розраховане за методичними рекомендаціями [12];

$Nu_{\Gamma}^{конд}$ – додаткова складова, пов’язана з конденсацією пари з димових газів при їх охолодженні нижче точки роси цієї пари.

$$Nu_{\Gamma}^{конд} = \tilde{A} \cdot Re_{\Gamma}^{0,6} \cdot e^{m \cdot \theta}, \quad (2)$$

де A – поправочний коефіцієнт, що залежить від вологовмісту $X_{вх}$:

$$\tilde{A} = 0,0001 \cdot e^{87 \cdot X_{вх}} + \frac{0,3}{X_{вх}}; m = -14;$$

$$m = -14; \theta - \text{безрозмірна температура: } \theta = \frac{t_{в}}{t_{р}}.$$

Розглядалися водогрійні котельні установки теплопродуктивністю 2 МВт. Вихідні дані для розрахункових досліджень наведено в табл.1.

В роботі запропоновано варіанти систем глибокої утилізації теплоти відхідних газів котла, призначені для нагрівання відповідно до потреб котельень таких теплоносіїв: зворотної тепломережної води котельні, холодної води, що надходить в систему хімоводоочищення, та дуттьового повітря (рис. 1). Для нагрівання цих теплоносіїв застосовуються відповідні теплоутилізатори (ВП, ВП ХВО та ПН). З метою запобігання корозійного руйнування димових труб теплоутилізаційні системи оснащені засобами для реалізації двох теплових методів відвернення конденсатуутворення в газовідвідних трактах – повітряного та підсушування охолоджених газів шляхом їхнього підігрівання [2,13]. Для реалізації повітряного методу встановлюється додатковий повітропідігрівач ДПН, у якому відхідними газами котла нагрівається частина повітря для підмішування у вихідний газохід, а для методу підсушування – газопідігрівачі ГП.

Таблиця 1 – Вихідні дані для теплового розрахунку водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів

Найменування параметра	Значення
Навантаження котла, %	30 ÷ 100
Теплопродуктивність котла в номінальному режимі, МВт	2,0
Витрата природного газу, м³/год	70 ÷ 200
Витрата димових газів, кг/с	0,3 ÷ 0,9
Температура газів на виході з котла в номінальному режимі, °C	157
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Вологовміст газів на виході з котла, кг /кг с.г.	0,135
Витрата води через котел, кг/с	19
Витрата холодної води на ХВО, кг/с	0,24 ÷ 0,38
Температура зворотної води, °C	30 ÷ 70
Температура води на ХВО, °C	5
Температура навколишнього середовища, °C	-20 ÷ +10
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °C	-20
Розрахунковий перепад температур для системи опалення Δt_o , °C	25
ККД котла без теплоутилізаторів за нижчою теплотою згоряння палива, %	92 ÷ 94

Згідно з доцільністю розміщення теплоутилізаторів у напрямі зменшення початкової температури нагріваного теплоносія за ходом димових газів, за котлом першими встановлюються додатковий повітрянагрівач ДПН (за необхідності підігрівання повітря для підмішування до високої температури) та теплоутилізатор для нагрівання зворотної тепломережної води ВП.

Щодо теплоутилізаторів для нагрівання води на хімводоочищення (ХВО) та дуттьового повітря (ПН), то вирішення завдання їхнього розміщення в теплоутилізаційній системі не є однозначним. Так протягом опалювального періоду діапазон зміни початкової температура повітря на горіння становить -20...+10 °C, води на ХВО – 2...10 °C. У відомій теплоутилізаційній системі [14], що розглядається в роботі варіантом 1 (рис.1а), використання теплоти димових газів реалізується при послідовному надходженні відхідних димових газів від котла в теплоутилізатор для нагрівання зворотної тепломережної води, далі в теплоутилізатор для попереднього підігрівання дуттьового повітря ПН, потім у теплоутилізатор для нагрівання холодної води на хімводоочищення ВП ХВО.

Другим варіантом корисного використання теплоти димових газів може слугувати теплоутилізаційна система (рис. 1б), в якій на відміну від першого варіанту теплоутилізатор для нагрівання води на хімводоочищення ВП ХВО встановлюється перед теплоутилізатором ПН.

В роботі виконано розрахункові дослідження ефективності зазначених варіантів систем. При виконанні досліджень розглядалися водогрійні теплоутилізатори, що компонувались із пучків оребрених біметалевих труб (сталева основа та алюмінієве оребрення). При цьому в пучках застосовувалися труби з внутрішнім діаметром 25 мм і товщиною 3,5 мм. Висота оребрення біметалевих труб дорівнювала 11 мм, а міжреберний крок – 3,5 мм. Повітрогрійними теплоутилізаторами слугували пластинчасті теплообмінники з нержавіючої сталі. Товщина пластин становила 2 мм, а крок 10 мм.

На рис. 2, 3 наведено результати залежності від температури навколишнього середовища t_{nc} протягом опалювального періоду теплопродуктивності Q , ККД, коефіцієнта використання теплоти палива котла КВТП котла $\Delta\eta$ та витрати конденсату $G_{конд}$ при різному компонуванні теплообмінників-теплоутилізаторів в теплоутилізаційній системі для двох розглянутих варіантів.

Як видно з наведених результатів, загальні досліджувані показники теплоутилізаційних систем (теплопродуктивність Q , коефіцієнт використання теплоти палива котла КВТП котла $\Delta\eta$ та витрата конденсату $G_{конд}$) є дуже близькими для обох варіантів. Так Q змінюється в межах 120...190 КВт, КВТП котла $\Delta\eta$ – 6,8...8,3% та $G_{конд}$ – 0,027...0,040 кг/с. Перерозподіл цих показників у розглянутих системах здійснюється в окремих теплоутилізаторах.

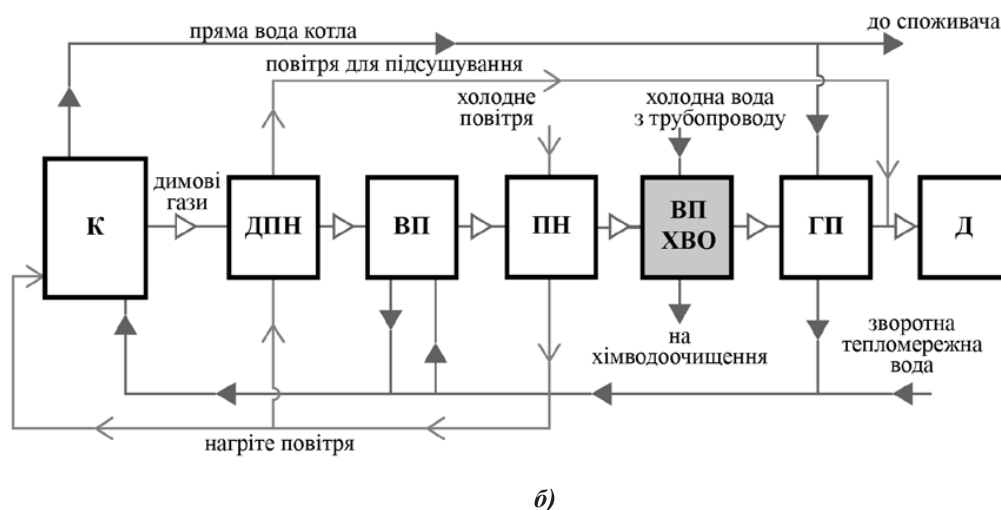
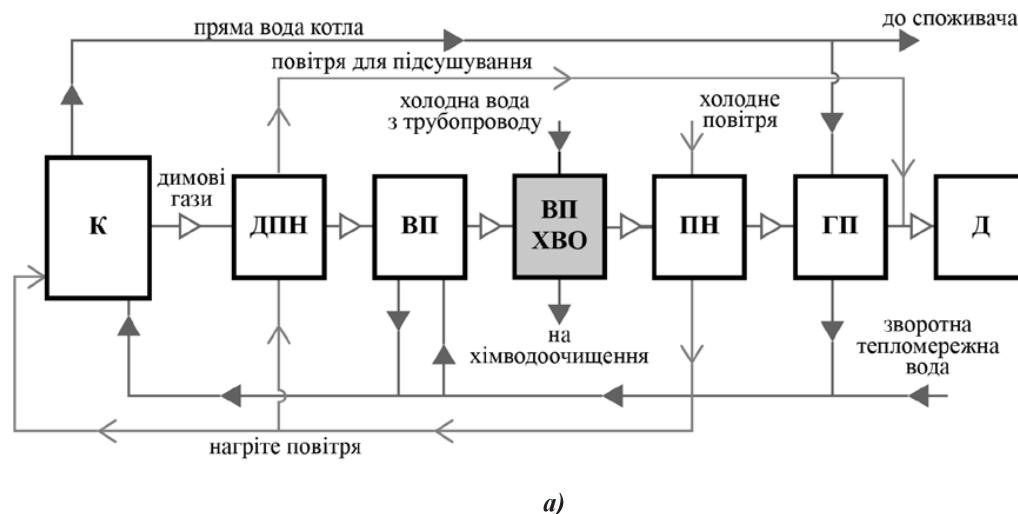


Рис. 1. Варіанти теплоутилізаційних систем опалювальних котлів при нагріванні різних теплоносіїв
 К – котел; ДПН – додатковий повітрянагрівач; ВП – водопідігрівач; ВП ХВО – підігрівач води на хімоводоочищення; ПН – повітрянагрівач; ГП – газопідігрівач; Д – димова труба

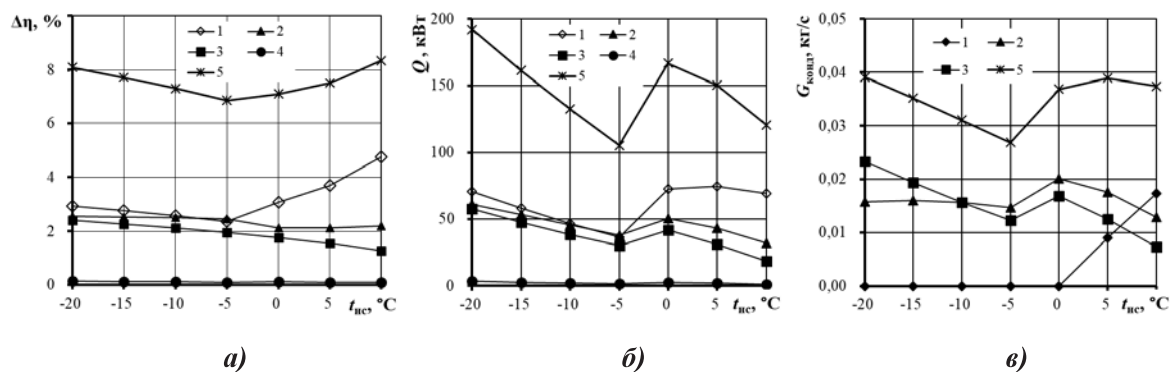


Рис. 2. Рівні приросту ККД та КВТП котла (а), теплотворності (б) та обсягів утворюваного конденсату (в) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН
 1 – водопідігрівач ВП; 2 – підігрівач води на хімоводоочищення ВП ХВО; 3 – повітрянагрівач ПН; 4 – додатковий повітрянагрівач ДПН; 5 – уся теплоутилізаційна система.

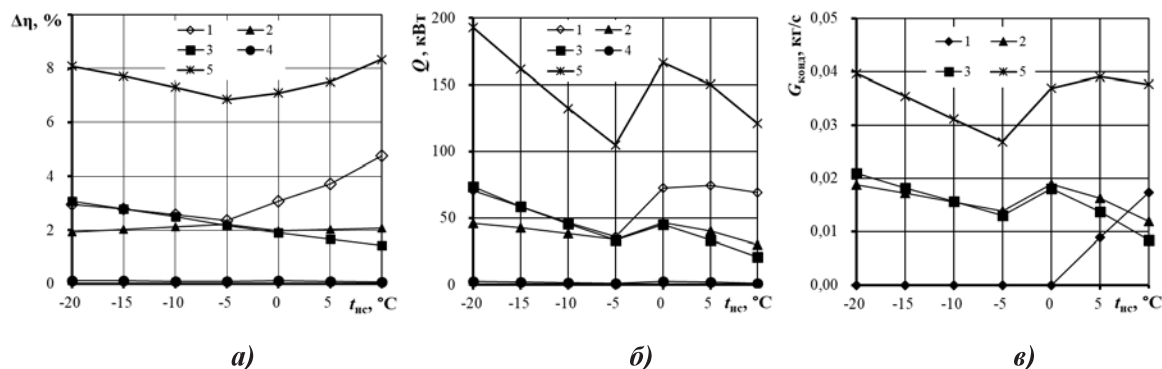


Рис. 3. Рівні приросту ККД та КВТП котла (а), теплопродуктивності (б) та обсягів утворення конденсату (в) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО після повітрянагрівача ПН
 1 – водопідігрівач ВП; 2 – підігрівач води на хімоводоочищення ВП ХВО; – повітрянагрівач ПН; 4 – додатковий повітрянагрівач ДПН; 5 – уся теплоутилізаційна система

Отримані результати дозволяють при створенні теплоутилізаційних систем враховувати інші особливості компонування теплообмінників-теплоутилізаторів в цих системах. А саме: використання другого з розглянутих варіантів систем, при розміщенні теплоутилізатора для нагрівання дуттьового повітря ПН після теплоутилізатора для нагрівання води на хімоводоочищення (ВП ХВО), дає змогу конструкційного агрегування теплоутилізаторів ВП та ВП ХВО в одному корпусі. Це забезпечує зменшення втрат теплоти з поверхні з'єднувальних трубопроводів та газоходів, вищу компактність теплоутилізаційної установки, що є дуже важливим в умовах зазвичай дефіциту вільних площ в котельнях. На основі виконаних досліджень можна зробити вибір на користь пріоритетного застосування даного варіанту теплоутилізаційної системи.

Висновки.

1. Виконано дослідження ефективності двох запропонованих комбінованих систем утилізації теплоти відхідних газів опалювальних котлів за такими показниками, як: теплопродуктивність, рівень приросту коефіцієнта використання теплоти палива котла КВТП, обсяг утвореного конденсату.

2. Показано, що застосування запропонованих систем дозволяє реалізовувати режими їхньої роботи зі зниженням температури газів нижче точки роси протягом усього опалювального періоду та завдяки цьому підвищити КВТП котла на 6,8...8,3 %.

3. Встановлено, що для обох розглянутих варіантів теплоутилізаційних систем та в усіх режимах роботи котельної установки загальні показники теплопродуктивності, рівня приросту коефіцієнта ви-

користання теплоти палива котла КВТП та обсягів утвореного конденсату є близькими за величиною. Відмінності у запропонованих варіантах стосуються лише перерозподілу значень вказаних показників у різних теплообмінниках-теплоутилізаторах системи.

4. За даними досліджень пропонується компонування теплоутилізаційної системи з розміщенням теплообмінника ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН, оскільки дане рішення дозволяє агрегувати два водогрійних теплоутилізаторів (ВП та ВП ХВО) в одному корпусі. Вказане агрегування забезпечує підвищення компактності теплоутилізаційної установки та зменшення втрат теплоти з поверхні з'єднувальних газоходів та трубопроводів.

ЛІТЕРАТУРА:

- Ефимов А.В., Гончаренко А.Л., Гончаренко Л.В., Есипенко Т.А. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения: монография. Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. 233с. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32826>.
- Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника. 2014. № 4. С. 27–36.
- Фиалко Н. М., Аронов И. З., Навродская Р. А., Пресич Г. А. Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения. Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 3. С. 36–41.

4. Кудинов А.А., Зиганишина С.К. Охлаждение продуктов сгорания природного газа в конденсационных теплоутилизаторах. Промышленная энергетика. 2010. №4. С. 39–43.
5. Капишиников А.П. Принципы развития конструкции конденсационных экономайзеров. Промышленная энергетика. 1999. №3. С. 29–33.
6. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. 2020. No2. P. 96–100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20202/096>
7. Фіалко Н. М., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Шевчук С. І. Підвищення ефективності комбінованих теплоутилізаційних систем газоспоживальних котельних установок. Науковий вісник НЛТУ України. 2019. Т.29, № 6, С. 79–82. <https://doi.org/10.15421/40290616>
8. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Nauka innov. 2020. V. 16, no. 2. P. 47–53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>
9. Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I. Complex Methods for Analysis of Efficiency and Optimization of Heat-Recovery Systems. Sci. innov. 2021. V. 17, no. 4. P. 11–18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>
10. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики: монографія / Н.М. Фіалко та ін.: Київ: «Про формат». 2019. 192 с.
11. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 296 с.
12. Навродская Р.А., Степанова А.И., Шевчук С.И., Гнедаш Г.А., Пресич Г.А. Экспериментальное исследование теплообмена при глубоком охлаждении продуктов сгорания газопотребляющих котлов. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28, №6. С. 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>
13. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография / Н.М. Фіалко и др.: Киев: «Про формат». 2018. 248 с.
14. Котельна установка: пат. 124125 Україна: МПК F22B 33/00, F22D 1/36, F24H 8/00, F23L 15/00. № 201910480; заявл. 21.10.19; опубл. 21.07.21, Бюл. № 29.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF COMPLEX HEAT RECOVERY SYSTEMS OF BOILER PLANTS

Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Presich G.O.

Institute of engineering thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Maria Kapnist St., Kiev, 03680, Ukraine.

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.10>

The results of studies for heating boiler plants of the main thermal characteristics of complex heat recovery systems with deep cooling of flue gases of higher thermal efficiency are presented. Systems for heating various heat-transfer agents, which, in accordance with the needs of heating boiler houses, can be return heat-network water, cold water entering the chemical water-purification system (CWP), and combustion air are considered. Two effective variants of such complex systems have been developed. These options differ in the sequence of installation of heat recovery exchangers for heating combustion air and cold water for the chemical water-purification. In the first variant, the heat-recovery exchanger for heating air is placed after the heat-recovery exchanger for heating the heat-network water in front of the heat exchanger for heating water for the CWP, and in the second, on the contrary, after the latter. In order to protect the gas exhaust ducts from condensate formation, these systems provide for the joint application of two thermal methods: air and drying in the gas-heater. The thermal efficiency of the developed system options was investigated according to such indicators as efficiency and coefficient the use heat of fuel of boiler CUHF, heating capacity and condensate formed volume of the system in different modes of boiler operation during the heating period. Studies have shown that these systems provide a 6.8-8.3% increase in coefficient the use heat of fuel of boiler CUHF. At the same time, the total indicators of the considered heat recovery systems are approxi-mately the same for the two options. The redistribution of the values of these indicators is carried out in separate heat-recovery exchangers. On the basis of the conducted studies, the choice of the most rational option of the complex heat recovery system with the placement of heat recovery exchangers according to the second of the considered options is substantiated. This technical solution allows the aggregation of two water-heating exchangers in one housing. This aggregation provides increased compactness of the heat-recovery equipment and reduction of heat losses from the surface of the connecting gas ducts and pipelines.

References 14, tables 1, figures 3.

Key words: gas-fired boiler plants, exhaust gases, heat recovery systems, various heat-transfer agent, efficiency.

1. Efimov A.V., Goncharenko A.L., Goncharenko L.V., Esipenko T.A. Modern technologies of deep cooling of fuel combustion products in boiler plants, their problems and solutions: monograph. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. 233 p. Retrieved from <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32826>. (in Rus.)

2. Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Navrodska R.A., Gnedash G.A. Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power. Industrial heat Engineering. 2014. no 4. P. 27-36. (in Rus.)

3. Fialko N.M., Aronov I. Z., Navrodska R.A., Presich G. A. Effektivnost primeneniia kondensatsionnykh teploutilizatorov v sistemakh teplosnabzheniia [Efficiency of using condensing heat exchangers in heat supply systems]. Industrial heat Engineering. 2003. V. 25. no 3. P. 36-41. (in Rus.)

4. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. Okhlagdeniie produktov sgoraniia priridnogo gaza v kondensatsionnykh teploutilizatorakh [Cooling of natural gas combustion products in condensing heat exchangers]. Industrial energy. 2010. no4. P. 39-43. (in Rus.)

5. Kapishnikov A.P. Printsipy razvitiia konstruktssii kondensatsionnykh ekonomayzerov [Development principles of the condensing economizers design]. Industrial energy. 1999. no 3. P. 29-33. (in Rus.)

6. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk. 2020. no2. P. 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20202/096>

7. Fialko N. M., Gnedash G. O., Navrodska R. O., Presich G. O., Shevchuk S. I. Improving the efficiency of complex heat-recovery systems for gas-fired boiler installations. Scientific Bulletin of UNFU. 2019. Vol.29, no 6, P. 79-82. <https://doi.org/10.15421/40290616>

8. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Nauka innov. 2020. V. 16, no. 2. P. 47-53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

9. Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I. Complex Methods for Analysis of Efficiency and Optimization of Heat-Recovery Systems. Sci. innov. 2021. V. 17, no. 4. P. 11-18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>

10. Fialko N., Navrodska R., Presich G., Gnedash G., Shevchuk S., Stepanova A. Kombinovani teploutyly-zatsiini systemy dlia gazospozhyvalnykh kotliv komunalnoi

teploenergetyky [Combined heat utilization systems for gas-fired boilers of communal heat energy]. Kiev: Printing house "About format". 2019.192p.

11. *Teplovoy rasschet kotelnykh agregatov* [Thermal calculation of boiler units]. Normative method / ed. N.V. Kuznetsova M.: ECOLIT, 2011. 296 p. (in Rus).

12. *Navrodska R. A., Stepanova A. I., Shevchuk S. I., Gnedash G. A., Presich G. A.* Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers. Scientific Bulletin of UNFU. 2018. Vol.28, no 6. P. 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>

13. *Teplovyye metody zashchity gazootvodiashchikh traktov kotelnykh ustanovok* [Thermal methods for the protection of the exhaust ducts of boiler plants]. N.M. Fialko et. al. Kyiv: «Pro format». 2018. 248 p. (in Rus).

14. *Котельна установка*: пат. 124125 Україна: МПК F22B 33/00, F22D 1/36, F24H 8/00, F23L 15/00. № 201910480; заявл. 21.10.19; опубл. 21.07.21, Бюл. № 29.

Отримано 16.05.2022

Received 16.05.2022

УДК 621.18-5

ВПЛИВ ЗАМІЩЕННЯ ЧАСТИНИ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ ПІРОЛІЗНИМИ ГАЗАМИ НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА ТПП 312 ПРИ ЙОГО РОБОТІ НА ПОНИЖЕНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, Халатов А.А., академік НАН України

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.11>

Встановлено, що при подачі продуктів піролізу біомаси з первинним повітрям рівномірно крізь всі пальники, що знаходяться в роботі, спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження 170 МВт. Заміщення частки вугілля на продукти піролізу біомаси не призводить до зменшення генерації оксидів азоту. Навпаки спостерігається незначне зростання емісії оксидів азоту зі збільшенням частки піролізних газів для навантажень 210...170 МВт.

It was found that when feeding pyrolysis products of biomass with primary air evenly through all burners in operation, there is an increase in heat flow through the bottom of the furnace and it is possible to expand the lower limit of the boiler to a load of 170 MW. The substitution of coal for biomass pyrolysis products does not reduce the generation of nitrogen oxides. On the contrary, there is a slight increase in the emission of nitrogen oxides with an increase in the part of pyrolysis gases for boilers loads of 210 - 170 MW.

Бібл. 7, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: біомаса, піролізні гази, спалювання вугілля, оксиди азоту.

d – діаметр, м;

T – температура, К;

$[Y_i]$ – масова концентрація компоненти.

Індекси:

e – електрична потужність, Вт

t – теплова потужність, Вт

ave – осереднене значення

max – максимальне значення

Скорочення:

ТЕС – теплова електростанція.

Зниження викидів шкідливих речовин від ТЕС є однією з актуальних задач сьогодення. Одним з можливих шляхів зниження викидів оксидів азоту від пилувугільного котла ТПП 312 є використання технології *Reburning* з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення. Як приклад може бути взято котел ТПП 312 енергоблоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС зі змонтованою системою спалювання вугілля за технологією *Reburning*, яка розрахована на використання природного газу в якості палива допалення та не використовується на теперішній час через ліміти на використання природного газу. В роботі [1] розглянуто перспективи використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту за технологією *Reburning* на прикладі пилувугільного котла ТПП 312.

Система триступеневого спалювання вугілля (*Reburning*) була змонтована на типовий проект котла ТПП 312, під час його реконструкції. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 блоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС після реконструкції наведена на рис.1. Система

розрахована на спалювання вугілля в основних пальниках в обсязі 88% теплової потужності котла з надлишком повітря 1,05. Ефективність зниження оксидів азоту системою триступеневого спалювання вугілля з використанням продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення складає 23,1 % в порівнянні зі стандартним проектом котла ТПП 312 [1] при навантаженнях котла близьких до максимальних. В роботі [1] було встановлено, що система триступеневого спалювання вугілля може бути реалізована при навантаженнях котла 210...280 МВт. Нижня межа навантаження обумовлена температурними умовами в низу топки котла для забезпечення рідкого видалення шлаку. Верхнє обмеження потужності котлоагрегату обумовлено умовами відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника, яке виникає внаслідок розтягування факелу в топці котла внаслідок введення частини палива через додаткові пальники для утворення зони відновлення оксидів азоту.

В даній роботі було розглянуто вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними газами на екологічні та технологічні показники котла ТПП 312 при його роботі на понижених навантаженнях. Розглядалася можливість використання продуктів піролізу біомаси для забезпечення умов рідкого видалення шлаку вниз топки котла. Передбачалось, що піролізні гази додаються у потік аеросуміші і разом з вугіллям потрапляють до топки котла.

Котли ТПП 312 на Ладизинській ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Осереднені характеристики вугілля наведені в роботі [2-5].

Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини (КБМ). Результати аналізу вугільного пилу, що йде на спалювання, на ситах з чарункою 90 мкм та 200 мкм, дали наступні результати $R_{90} = 30\%$, $R_{200} = 4\%$. Використовуючи ці результати було отримано розподіл Розіна-Раммлера:

$$R_x = \exp\left(-\left(\frac{d}{77,4}\right)^{1,23}\right).$$

Еквівалентний діаметр часточки, який характеризує дану суміш складає 45,58 мкм.

Склад продуктів піролізу біомаси був прийнятий наступний [6]: $[CH_4] = 0,01984$; $[CO] = 0,4122$; $[CO_2] = 0,27821$; $[H_2] = 0,00337$; $[N_2] = 0,28638$. Було прийнято допущення, що горіння піролізних газів відбувається за трьохстадійним механізмом горіння метану [7]:

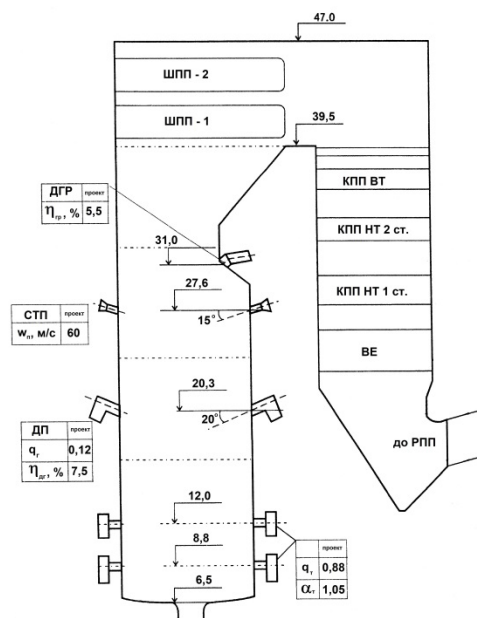
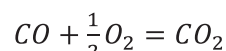
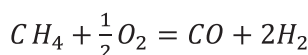
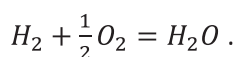


Рис. 1. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 з системою триступеневого спалювання блоку № 4 Ладизинська ТЕС [1]

Таблиця 1. Фізико-хімічні характеристики вугілля [2-5]

Технічний аналіз						Елементний склад на суху горючу масу					
$W_p, \%$	$W_{гн}, \%$	$A^c, \%$	$S_{огт}^c, \%$	$V_r, \%$	$Q_{рн}, \text{МДж/кг}$	$S_r, \%$	$C_r, \%$	$H_r, \%$	$N_r, \%$	$O_r, \%$	$Q_{рн}, \text{МДж/кг}$
13,2	2,2	23,6	1,8	42,0	20,9	1,21	82,31	5,51	2	8,97	33,94



Дослідження було виконана за допомогою пакета прикладних програм *Ansys CFX*, з адаптованою моделлю горіння вугілля. Модель горіння була розроблена та пройшла верифікацію в попередніх дослідженнях. Детальний опис моделі горіння вугілля наведені в роботах [2 – 5].

Режими пониженого навантаження реалізуються шляхом відключення частини пальників. В роботі розглянуто випадок, коли для зниження навантаження відбувається відключення чотирьох крайніх пальників верхнього ярусу. При відключенні пальника через нього відсутня подача палива, а для охолодження пальника залишається подача первинного повітря як для випадку робочого пальника та подача вторинного повітря у розмірі 10% від значення для номінального навантаження [5].

При проведенні дослідження спочатку було розглянуто випадок, коли продукти піролізу біомаси подаються з первинним повітрям крізь пальники, що знаходяться в роботі. Витрата первинного повітря збільшувалася на відповідну кількість піролізних газів з одночасним перерахунком масових концентрації складових газової суміші.

До розгляду були взяті наступні значення навантажень котлоагрегату 210, 190, 170 та 150 МВт_г. Частка продуктів піролізу біомаси в тепловому балансі котлоагрегату приймалися у 10 та 20%. Для порівняння також був розрахований режим роботи котлоагрегату тільки на вугіллі.

Для оцінки екологічних характеристик котла до розгляду бралось значення масової витрати оксиду азоту на виході з котла. Для контролю експлуатаційних характеристик котла увагу було зосереджено на значеннях температур в горизонтальних перетинах, які знаходяться по осях пальників першого та другого ярусів. Також контролювалося сумарне значення втрати палива від недопалу та значення теплового потоку через дно топки котла, для оцінки забезпечення умов рідкого видалення шлаку.

Для визначення впливу заміщення частини вугілля продуктами піролізу біомаси контролювалися наступні параметри:

- На виході з котла – масові витрати оксидів азоту, оксиду вуглецю та коксового залишку;
- Повний тепловий потік до поду топки (Q_{bot});

- Значення максимальної та осередненої температур у горизонтальному перетині, що розташований по осях пальників першого ярусу (T_{lmax}, T_{lave});

- Значення максимальної та осередненої температур у горизонтальному перетині, що розташований по осях пальників другого ярусу (T_{2max}, T_{2ave});

Мінімальний тепловий потік з поду котла для забезпечення умови для рідкого видалення шлаку становить 29 – 30 МВт_г. Це значення бралось до уваги при аналізі впливу частки газів піролізу біомаси на технологічні параметри роботи котла.

Сумарні втрати палива визначалися на виході з розрахункової області як сума добутків витрат горючих компонент на їх питому теплоту згоряння. Результати впливу частки газів піролізу біомаси в паливному балансі на технологічні та екологічні характеристики котла ТПП 312 зведені в табл. 2.

Розрахунки полів температури (рис. 2) та концентрацій оксиду азоту (рис. 3) в середині котла ТПП 312 при подачі продуктів піролізу біомаси з первинним повітрям рівномірно крізь всі пальники, що знаходяться в роботі показали що спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження 170 МВт_г.

Заміщення частки вугілля на продукти піролізу біомаси не призводить до зменшення генерації оксидів азоту. Навпаки спостерігається незначне зростання емісії оксидів азоту зі збільшенням частки піролізних газів для навантажень 210...170 МВт_г. Цей факт пояснюється тим що при зменшенні утворення оксидів азоту за паливним механізмом, в наслідок заміни частини вугілля газами, що не містять в собі паливного азоту спостерігається збільшення утворення частки оксидів азоту за термічним та швидким механізмами. Збільшення утворення оксидів азоту за термічним механізмом пояснюється збільшенням зони температурного вікна 1100...1500 К в об'ємі топки котла в наслідок затягування горіння оксиду вуглецю, що міститься у піролізних газах та потребує більшого часу перебування для повного згоряння. Даний факт також пояснює збільшення втрат палива.

Збільшення генерації оксидів азоту при заміщенні частини вугілля на продукти піролізу біомаси певною мірою пов'язано з присутністю водню в піролізних газах. Водень має високу реакційну спроможність, що веде до миттєвого згоряння при потраплянні в топку котла з локальним підвищенням температур в зонах, що збагачені киснем.

Таблиця 2. Вплив частки газів піролізу біомаси в паливному балансі на технологічні та екологічні характеристики котла ТПП 312

Відсоток газів піролізу біомаси в паливному балансі	NO, кг/с	Сумарні втрати палива, Вт _т	T_{1max}, K	T_{1ave}, K	T_{2max}, K	T_{2ave}, K	Q_{bot}, MBT_t
Навантаження котла 210 MBT _т							
0	0,2465	74	2014	1232	2020	1496	43
10	0,2568	496	1891	1406	1937	1517	36
20	0,2519	654	1876	1457	1900	1338	32
Навантаження котла 190 MBT _т							
0	0,2475	85	1905	1336	1948	1407	28,43
10	0,2513	480	1908	1360	1912	1479	31
20	0,2574	650	1905	1294	1916	1447	30,9
Навантаження котла 170 MBT _т							
0	0,2287	165	1945	1320	1989	1350	27,25
10	0,2464	459	1970	1296	1963	1440	31,45
20	0,2564	617	1991	1236	2012	1398	30,1
Навантаження котла 150 MBT _т							
0	0,2414	291	1884	1325	1914	1384	26,5
10	0,2206	457	2042	1182	1925	1337	29,5
20	0,2257	875	1960	1186	1944	1312	27,7

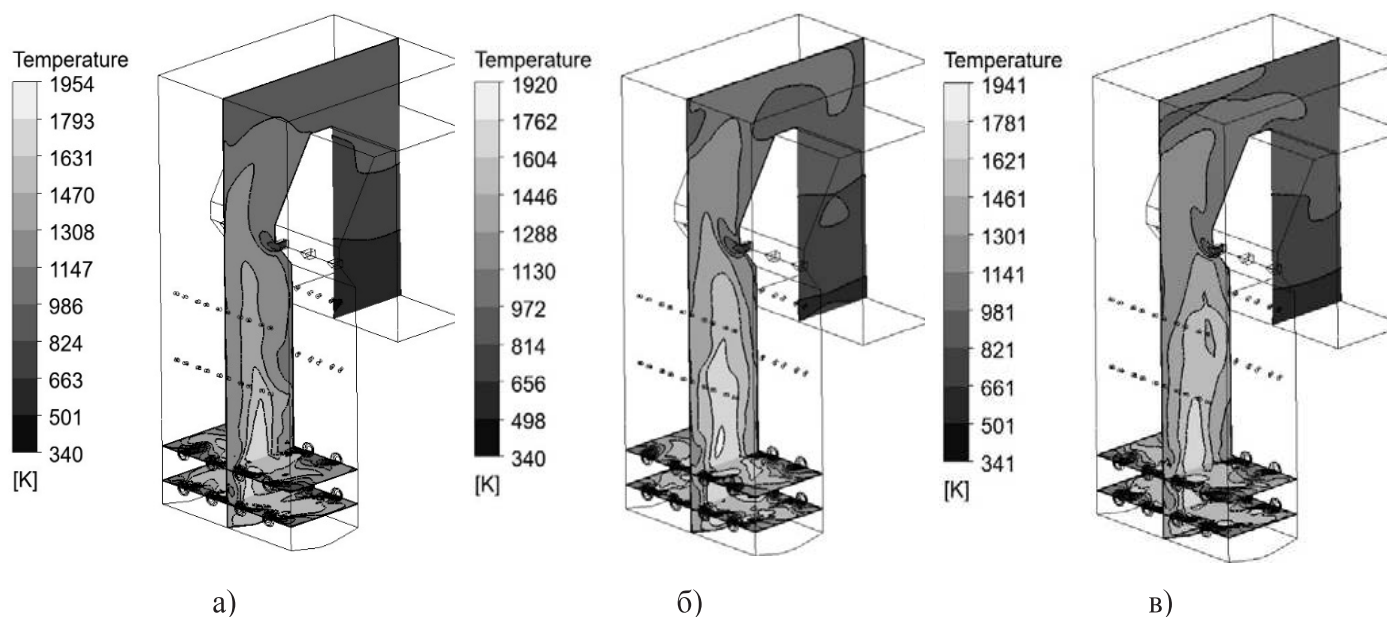


Рис. 2. Вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними газами на температурне поле середині топки котла: а) – вугілля 100%; б) – вугілля 90% + піролізні газы 10%; в) – вугілля 80% + піролізні газы 20%;

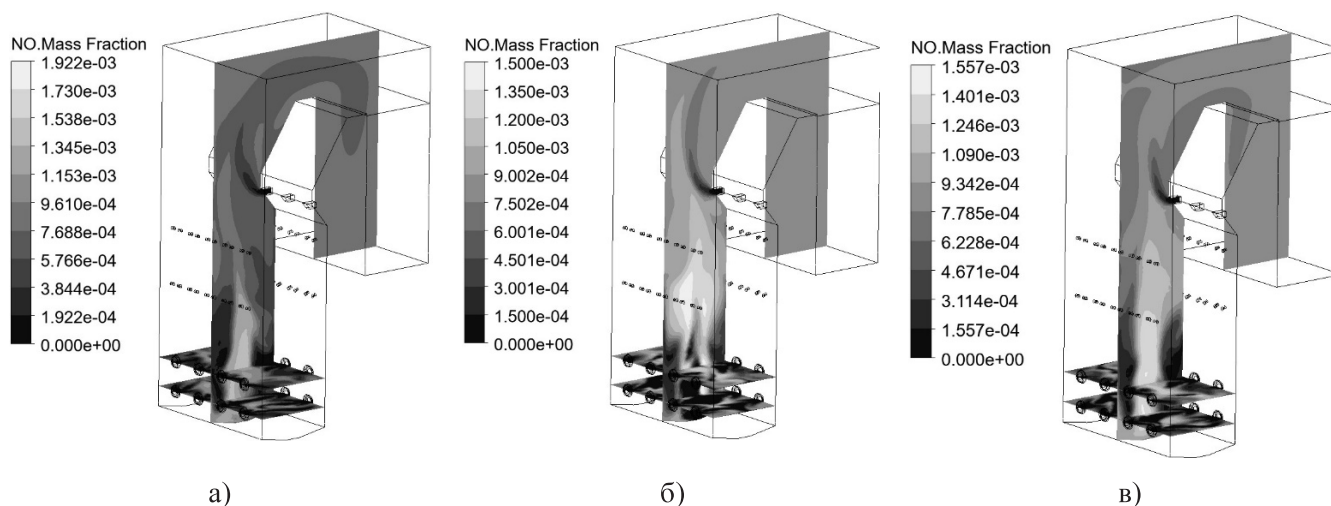


Рис. 3. Вплив заміщення частини вугільного палива піролізними газами на генерацію оксидів азота в середині топки котла: а) – вугілля 100%; б) – вугілля 90% + піролізні гази 10%; в) – вугілля 80% + піролізні гази 20%.

На другому етапі роботи було досліджено вплив частки газів піролізу біомаси на екологічні та технологічні характеристики роботи котла при подачі продуктів піролізу біомаси у крайні пальники першого ярусу. Ця серія мала на меті дослідити вплив концентрованої подачі газоподібного палива у крайні пальники нижнього ярусу на температурний стан поду котла та вплив на хімічний недопал палива.

В цій серії розрахунків у пальники, що розташовані у центрі котла у першому та другому ярусах (пальники №№2,3,6,7 на фронті котла та №№10,11,14,15 та тилу котла) подавалось тільки вугілля. Бокові пальники другого ярусу (№№5,8 на фронті котла та №№13,16 на тилу котла) були відключені з роботи, паливо в них не подавалось. Для охолодження пальників подавалася суміш повітря та димових газів через канал аеросуміші, та через канал вторинного повітря витрата повітря у розмірі 10% від витрати працюючого пальника. У крайні пальники першого ярусу (№№1,4 на фронті котла та №№9,12 на тилу котла) подавалися продукти піролізу біомаси у розмірі 10 чи 20% від теплової потужності котла та решта вугілля. Витрата продуктів піролізу біомаси та вугілля були рівномірно розподілені між 4 боковими пальниками нижнього ярусу.

Проведені розрахунки показали, що як і для першого способу спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження н 170 МВт_е, але при подачі піролізних газів у крайні пальники першого ярусу збільшення теплового потоку менше.

Висновки

Підводячи підсумок, можна зазначити, що заміна частини вугілля продуктами піролізу біомаси при роботі котла ТПП 312 на понижених навантаженнях дозволяє забезпечити стабільну роботу котла до 170 МВт_е, але разом з цим погіршує екологічні та економічні характеристики. Кращі результати дає випадок коли подача продуктів піролізу біомаси організовано рівномірно у аеросуміш пальників, що працюють.

Робота виконана в межах наукової роботи Н.Е.4.4 «Підвищення екологічності котла ТПП 312 шляхом застосування технології Reburning при використанні традиційних та відновлюваних джерел енергії» цільової програми НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії».

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Використання технології reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення для зниження емісії оксидів азоту від котла ТПП 312// Теплофізика та Теплоенергетика. – 2021. – 43, №1. – С. 82-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10>
2. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення зон підвищеної ерозії топкових екранів в залежності від режиму навантаження котлоагрегату ТПП 312 Ладизинської ТЕС// Пром. теплотехніка. — 2011. — 33, № 4. — С. 55-62.
3. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою

ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладизинська ТЕС // Вісник НТУУ ХПІ. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №13(1056). – С.85–91.

4. *Зменшення ерозії топкових екранів шляхом керування структурою течії в об'ємі топки котла ТПП-312/ Кобзар С.Г., Халатов А.А.// в кн.. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010-2012 рр. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. – 612 с./ - С. 279 – 288.*

5. *Кобзар С.Г., Халатов А.А. Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення//Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39 – №.5. – С. 91 – 96.*

6. *Кобзар С.Г., Халатов А.А. Використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту: тестування механізму хімічної кінетики // Теплофізика та теплоенергетика, 2020, т. 42, №2, с.92-98; <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10>*

7. *Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames // Combustion Science and Technology, 1981, Vol. 27, pp. 31–43.*

THE EFFECT OF REPLACEMENT OF PART OF THE COAL DUST BY PYROLYSIS GASES ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL PERFORMANCE OF THE BOILER TPP 312 DURING ITS OPERATION AT LOW LOADS

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.11>

The paper was consider the influence of the replacement of part of coal dust by pyrolysis gases on ecological and technological operational parameters of TPP 312 boiler during its operation at low loads. The following values of boiler loads 210, 190, 170 and 150 MW were taken into account. The part of biomass pyrolysis products in the heat balance of the boiler was taken in 10 and 20%.

It was found that when feeding pyrolysis products of biomass with primary air evenly through all burners in operation, there is an increase in heat flow through the bottom of the furnace and it is possible to expand the lower limit of the boiler to a load of 170 MW_e.

The substitution of coal for biomass pyrolysis products does not reduce the generation of nitrogen oxides. On the contrary, there is a slight increase in the emission of nitrogen oxides with an increase in the part of pyrolysis gases for boilers loads of 210...170 MW_e.

References 7, fig. 3, tab. 2.

Key words: biomass, pyrolysis gas, coal combustion, nitrogen oxides.

1. Kobzar, S., & Khalatov, A. [Use of the reburning technology with biomass pyrolysis products as a reburning fuel to reduce emissions of nitrogen oxides from TPP 312 boiler] // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2021, 43 (1), 82-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10> (in Ukr.)

2. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [Determination of zones of increased erosion of furnace screens depending on the load mode of the boiler CCI 312 Ladyzhynska TPP] // *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*. 2011. 33, № 4. P. 55-62. (in Ukr.)

3. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [Determination of the efficiency of reducing emissions of nitrogen oxides by a system of step-by-step combustion of a boiler of coal TPP-312 of block # 6 of DTEK Ladyzhinsk TPP] // *Bulletin of NTUU KhPI. Series: Power and heat engineering processes and equipment*. 2014 # 13 (1056). P.85-91 (in Ukr.)

4. *Reducing the erosion of furnace screens by controlling the structure of the flow in the volume of the furnace boiler TPP-312 / Kobzar SG, Khalatov AA* // in the book. [Problems of resource and safety of structures, structures and machines: Collection of scientific articles according to the results obtained in 2010-2012] Kyiv: Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. - 612 pp. / P. 279 - 288. (in Ukr.)

5. Kobzar, S., & Khalatov, A. [The investigation of the efficiency of the nitrogen oxides reduction by advanced reburning method application with the coal dust as a reburning fuel]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2017, 39(5), 91-96. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.15> (in Ukr.)

6. Kobzar, S., & Khalatov, A. [Application of the biomass pyrolysis products as a reburning fuel for nitrogen oxides reduction: testing the chemical kinetics mechanism]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2020, 42(2), 92-98. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10> (in Ukr.)

7. Westbrook C. K., Dryer F. L. *Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames* // *Combustion Science and Technology*, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.

Отримано 01.06.2022

Received 01.06.2022