

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

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

Том 45, № 2, 2023

Головний редактор – Снєжкін Ю.Ф.

Редакційна колегія:

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

Редакційна рада:

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

ЗМІСТ

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

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

Сорбційні та термодинамічні властивості
пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння5

Авраменко А.О., Тирінов А.І., Ковецька М.М.,
Кондратьєва О.О.

Плин мастила у вузькій клиноподібній щілині з
рухомою стінкою15

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

Теплогідравлічні характеристики міні-каналів,
виконаних за допомогою адитивної технології24

Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В.,
Меранова Н.О., Альошко С.О.

Аеродинаміка і сумішоутворення в пальниках з
багаторядною струменевою системою паливоподачі ...34

Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Іванов С.О.,
Граков О.П.

Вплив комбінованого сушіння колоїдних
капілярно-пористих матеріалів на енергетичні витрати .45

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І.,
Абдулін М.З.

Особливості експлуатації екологоефективних котельних
установок комунальної теплоенергетики55

Петрик О.А., Назаренко І.А.

Вдосконалення режимів розігрівання
високотемпературних агрегатів63

**ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА,
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ**

**Ободович О.М., Сидоренко В.В., Булій Ю.В.,
Степанова О.Є.**

Очищення стічних вод теплоелектростанцій (ТЕС)69

**Гелетука Г.Г., Желєзна Т.А., Кучерук П.П.,
Драгнєв С.В.**

Аналіз перспективних напрямків використання
енергетичного потенціалу біомаси України77

**Ободович О.М., Сидоренко В.В., Целень Б.Я.,
Резакова Т.А., Чернявський К.Є.**

Спосіб зниження солей жорсткості води і
тепломасообмінне обладнання для його реалізації87

**ТЕРМОДИНАМІКА ТА ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ,
АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА**

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

Критерії та умови високочастотної термодинамічної
нестійкості теплоносія в активній зоні ядерних
реакторів95

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

THERMOPHYSICS AND THERMAL POWER ENGINEERING

UKRAINIAN SCIENTIFIC JOURNAL

Published quarterly

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

Volume 45, № 2, 2023

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

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

Advisory Editorial Board:

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

CONTENTS

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

**Sniezhkin Yu.F., Dabizha N.O., Dmytrenko N.V.,
Malashchuk N.S.**

Sorption and thermodynamic properties of aromatic plants
as drying objects5

**Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Kovetskaya M.M.,
Kondratieva E.A.**

The flow of lubricant in a narrow wedge-shaped slot with a
movable wall is considered15

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

Thermo-hydraulic characteristics of additively
manufactured mini-channels24

**Fialko N.M., Prokopov V., Sherenkovskiy Ju.,
Meranova N., Alosko S.**

Aerodynamics and mixture formation in burners with a
multi-row jet fuel supply system34

**Petrova Zh.O., Slobodianiuk K.S., Ivanov S.O.,
Grakov O.P.**

Influence of combined drying of colloid capillary-porous
materials on energy expenditures45

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

**Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I.,
Abdulin M.Z.**

Operation features of environmentally efficient boiler plants
of municipal thermal power engineering.....55

Petryk O.A., Nazarenko I.A.

Improvement of thermal modes of warming up
high-temperature units63

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Bulii Y.V., Stepanova O.E.
Wastewater treatment of thermal power plants (TPP)69

**Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Kucheruk P.P.,
Drahniev S.V.**

Analysis of prospective directions for using ukraine's biomass
potential for energy77

**Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Tselen B.Y.,
Rezakova T.A.**

Method of reducing water hardness salts and heat and mass
exchange equipment for its implementation87

THERMODYNAMICS AND TRANSPORT PHENOMENA, NUCLEAR POWER ENGINEERING

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

Approaches to modeling conditions of thermoacoustic
instability in non-equilibrium two-phase coolant of nuclear
reactors95

УДК 664.8.047

СОРБЦІЙНІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРЯНО-АРОМАТИЧНИХ РОСЛИН ЯК ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ

Снєжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України, Дабіжа Н.О.², канд. техн. наук.,
Дмитренко Н.В.³, канд. техн. наук., Малащук Н.С.⁴

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dabizha.nataliia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6124-1981>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, natatal@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-4520-4205>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник, malashchuk_n@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-8648-1006>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.1>

В статті наведено результати досліджень сорбційних властивостей м'яти перцевої. Визначені величини чистої ізостеричної теплоти адсорбції за ізотермами пари води. Експериментально одержані питомі витрати теплоти на сушіння м'яти перцевої. Встановлено параметри процесів сушіння і зберігання м'яти перцевої, при яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій.

The article presents the results of study on sorption properties of peppermint leaves. The net isosteric heat of adsorption was calculated from moisture isotherms. The specific heat consumption for drying peppermint was obtained experimentally. The parameters of peppermint drying and storage, which ensure minimum specific energy consumption and maximum preservation of essential oils, were determined.

Бібл. 17, рис. 4.

Ключові слова: пряно-ароматичні трави, м'ята перцева, сушіння, адсорбція, теплота випаровування води.

H – ентальпія, кДж/моль;

d – вологовміст повітря, г/кг с.п.;

p – тиск, мм рт.ст.;

p/p_s – відносний тиск;

q – питома теплота випаровування, кДж/кг;

R – газова стала (8,314 Дж моль⁻¹ К⁻¹);

r – питома теплота паротворення, кДж/кг;

T – температура, К;

t – температура, °С;

W – вологовміст матеріалу, %;

w – вологість матеріалу, %;

φ – відносна вологість повітря.

Індекси:

a – адсорбційний;

st – ізостеричний;

s – насичення.

Вступ

Пряно-ароматичні трави широко використовуються у виробництві лікарських препаратів, ароматизаторів, фарбників, тощо. Високий попит на пряно-ароматичні трави в біотехнологічній, косметичній, фармацевтичній та харчовій промисловостях зумовив підвищені вимоги до технологічних процесів переробки пряно-ароматичної сировини для збереження біологічно активних речовин і ефірних олій. Сировинною базою для цих виробництв є культивовані рослини, наприклад, м'ята перцева. Слід зазначити, що світове виробництво м'яти перцевої становило в середньому 105 038 т у 2015-2018 рр., в тому числі у Східній Європі – 176 т [1].

В Україні офіційно використовують лише культивовану сировину м'яти перцевої, що широко розповсюджена по всій території.

М'ята перцева (*Mentha piperita* L.) є відомою лікарською ефірноолійною культурою, яку широко застосовують завдяки корисним властивостям і терапевтичній дії на організм людини. М'ята перцева є джерелом одержання аптечного листя та ефірної олії, а також її компонентів, зокрема ментолу, що використовуються у хіміко-фармацевтичній, парфумерно-косметичній, кондитерській, харчовій, лікєро-горілчаній, тютюновій промисловостях та медицині [2]. Основним активним компонентом м'яти перцевої є ефірна олія,

концентрація якої в листках м'яти коливається від 1,2 до 4,8 %, а в суцвіттях досягає 6 % [3]. В стеблах ефірна олія майже відсутня. До складу ефірної олії м'яти перцевої входять ментол (30–55 %), ментон (14–32 %), ізоментон (2–10 %), 1,8–цинеол (6–14 %), α -пінен (1,0–1,5 %), β -пінен (1–2 %), лімонен (1–5 %), неоментол (2,5–3,5 %), ментофуран (1–9 %), ментил ацетат (2,8–10,0 %), пулегон (максимум 4,0 %), карвон (до 1,0 %), ізопулегол (до 0,2 %) [4]. Інші групи біологічно активних речовин м'яти перцевої – флавоноїди (гесперидин, антоціанідини), дубильні речовини (6...12 %), тритерпеноїди (урсолова та олеанолова кислоти), бетаїн, каротиноїди [3]. Також м'ята є багатим джерелом мінералів, таких як Na, Mg, K, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Zn і Se [2]. Листя м'яти здебільшого споживають у свіжому або сушеному вигляді як ароматизатор в різних видах харчових продуктів, в чайних напоях. В медицині м'ята перцева визнана у світі в першу чергу своїми антимікробними та антиоксидантними властивостями, також широко відомі такі її лікувальні властивості як противірусні, антибактеріальні, проти-запальні, протигрибкові, протиастматичні, алопатичні, спазмолітичні, антисептичні тощо. Завдяки комплексу біологічно активних речовин м'ята перцева входить до складу багатьох фармацевтичних препаратів, для виготовлення яких використовують траву, листя та ефірну олію. Так, в Україні сировина м'яти перцевої у ролі інгредієнта чи основного компонента входить до складу 63 лікарських засобів [5].

М'ята швидкопсувна сезонна рослина, щоб зробити м'яту доступною для використання протягом усього року її необхідно зберегти. Єдиним шляхом збереження пряно-ароматичних рослин є сушіння, під час якого зменшення вологовмісту матеріалу дозволяє досягти на поверхні рослини такого рівня активності води, при якому унеможливаються мікробне псування та будь-які біохімічні реакції, що сприяє подовженню термінів зберігання. Крім того зменшуються витрати на пакування та транспортування висушеної трави.

Сушіння пряно-ароматичних трав здійснюється природним повітряно-гінзовим способом або нагрітим повітрям в сушильних установках. При природному сушінні процес зневоднення суттєво залежить від тепловологісних параметрів атмосферного повітря, які в нестабільних кліматичних умовах України змінюються в широкому діапазоні, що не дозволяє проводити зневоднення в сталих оптимальних умовах і призводить до неможливості одержати кінцевий продукт з необхідними якісними показниками. Сушіння нагрітим повітрям має ряд переваг: у сушарках можливо регулювати темпе-

ратурний режим процесу, швидкість та вологовміст сушильного агента. Організація контрольованого процесу сушіння дозволяє реалізувати оптимальні з точки зору збереження біологічно активних речовин пряно-ароматичної сировини режими. В зв'язку з цим значний інтерес становлять дослідження, що спрямовані на визначення гранично допустимої температури нагріву матеріалу, його рівноважної вологості в залежності від параметрів сушильного агента при різних режимах сушіння та питомих витрат енергії під час зневоднення пряно-ароматичної сировини.

Аналіз досліджень і публікацій

При дослідженні пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння важливе значення має визначення гранично допустимої температури нагріву матеріалу, при якій не відбуваються фізико-хімічні, біохімічні та структурні зміни. Для пряно-ароматичної сировини найбільш термочутливими компонентами в процесі сушіння є леткі ароматичні сполуки ефірних олій, змінювання концентрації яких залежить від способу сушіння, параметрів зневоднення (температури, швидкості повітря), тривалості процесу, а також від вологовмісту, сорту і віку рослини та інших чинників [6]. Найважливішу роль у збереженні летких сполук сушених трав під час зневоднення відіграє температура сушильного агента. Для визначення гранично допустимої температури нагріву м'яти проаналізовані експериментальні дані щодо впливу температури на вміст ароматичних речовин. В дослідженні [7] показано вплив різних температур сушіння на кількість та якість ефірних олій м'яти перцевої. Зазначено, що з підвищенням температури сушіння різко знижується вміст ефірної олії (% об./мас.) з 1,0 % при 40 °C до 0,14 % при 60 °C і 0,12 % при 80 °C, також відбуваються виражені зміни складу її основних компонентів. Добре корелюють з вище наведеними даними отримані в ІТТФ НАНУ результати дослідження впливу температури зневоднення на число аромату м'яти перцевої [8]. Виявлено, що підвищення температури теплоносія з 40 до 60 °C призводить до втрати аромату сушеної м'яти на 20 %. Подальше підвищення температури сушіння на 20 °C призводить до ще більших втрат – 42%. В статі [9] наведені результати дослідження впливу температури сушіння і швидкості повітря на вміст ефірних олій в листі м'яти водяної. Експеримент проводився при трьох температурах сушильного агента 40, 50 і 60 °C і його швидкості 1 і 2 м/с. Найвищий вміст ефірної олії (1,33 % об./мас.) спостерігався при температурі 40 °C і швидкості 1 м/с. Збільшення температури і швидкості теплоносія призводило до значних втрат ефірних олій.

Таким чином, застосування зависокої температури сушіння призводить до втрати летких сполук, а також до зміни концентрації та складу ефірних олій, що різко погіршує аромат та смак висушеної трави. Для запобігання втрат летких речовин гранично допустима температура нагріву м'яти перцевої не повинна перевищувати 35...40 °С.

Сушіння рослинних матеріалів пов'язано з видаленням з них води, а швидкість зневоднення визначається як тепло- і вологообміном між поверхнею тіла та сушильним агентом, так і переносом усередині тіла, обумовленим формою зв'язку вологи з матеріалом [10]. Для аналізу форм зв'язку вологи використовують ізотерми адсорбції вологих матеріалів, що є функціональною залежністю між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу при сталій температурі і тиску. Для низькотемпературного процесу сушіння пряно-ароматичних трав можливо застосувати гіпотезу про локальну термодинамічну рівновагу, згідно з якою в кожен малий проміжок часу на межі розділу фаз встановлюється рівноважний стан. Умови локальної рівноваги з'ясовуються з ізотерм адсорбції, що дозволяє встановити зв'язок між тепловолігнісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу в процесі сушіння, а також визначити масообмінний напір Δp [11]. Також з ізотерм адсорбції визначають температуру і вологовміст сушильного агента, що відповідають залишковому вологовмісту матеріалу.

Користуючись ізотермами адсорбції, можна пов'язати класифікацію стану вологи в матеріалі з процесом її видалення під час сушіння [10], а також одержати дані щодо теплоти випаровування вологи різних форм і видів зв'язку з матеріалом, тобто мати можливість дати енергетичну характеристику зв'язаній волозі. Рослинні тканини утримують крім вологи з фізико-механічною формою зв'язку й адсорбційно-зв'язану вологу. Для видалення адсорбційно-зв'язаної вологи необхідно підвести до матеріалу більше енергії, чим при випаровуванні вільної води. Загальні витрати енергії на видалення вологи з рослинних тканин при сушінні визначаються як сума питомої теплоти випаровування вільної води r і чистої теплоти адсорбції q_a : $q = r + q_a$ [12].

В теперішній час для визначення теплоти адсорбції харчових продуктів використовується два методи [13]:

- прямий метод калориметричного вимірювання теплоти, що виділяється під час сорбції;
- термодинамічний метод з застосуванням рівняння Клаузіуса-Клапейрона з визначенням чистої ізостеричної теплоти адсорбції q_a .

Калориметричні вимірювання технічно складні через необхідність точного вимірювання невеликої кількості теплоти, що виділяється. З цієї причини, в літературних джерелах теплоти сорбції харчових продуктів, що розраховані за ізотермами адсорбції, представлені більш широко ніж виміряні калориметрично, хоч вони мають вищий ступінь точності.

Знання теплоти адсорбції має велике значення при проектуванні обладнання для зневоднення та при розробленні енергоефективних режимів сушіння пряно-ароматичних рослин. Це пов'язано з тим, що теплота випаровування сорбованої води може зростати до значень, що перевищують теплоту пароутворення чистої води, оскільки пряно-ароматичні рослини зневоднюються до низького залишкового вологовмісту (5-15 %), при якому вода в матеріалі знаходиться в зв'язаному стані. Також дані з сорбційної рівноваги використовуються в таких технологічних процесах як зберігання, змішування і пакування та для прогнозування стабільності сухих продуктів і визначення термінів їхньої придатності.

Таким чином, знання сорбційних властивостей пряно-ароматичних рослин та визначення теплоти випаровування під час їх зневоднення є актуальними при розробленні ряду технологічних процесів (сушіння, зберігання, пакування) та створенні сушильного обладнання.

Мета роботи. Дослідження сорбційних та термодинамічних властивостей пряно-ароматичних рослин для визначення технологічних параметрів процесів сушіння і зберігання, при яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень свіжа трава м'яти перцевої була придбана у місцевого виробника в Україні. Початкове значення вологості листя у свіжому стані визначалося за ДСТУ 7804:2015 перед кожним експериментом і варіювалось в межах 75,6...88,1 %.

Для визначення рівноважної вологості листя м'яти перцевої залежно від відносної вологості повітря застосовувався тензометричний (статичний) метод Ван Бамелена. Суть методу полягає в тому, що зразки матеріалу з наперед визначеним вологовмістом витримують в екзикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти або різних солей. Відомій концентрації розчинів відповідає при даній температурі певний парціальний тиск пари, тобто відповідне значення відносного тиску p/p_s . Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г до досягнення постійної маси, при якій вологість їх відповідає рівноважній.

Для визначення питомої теплоти випаровування води було застосовано створений в ІТТФ НАНУ диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01 [14]. Принцип його роботи заснований на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу через випаровування та кількості тепла, що витрачене на це випаровування.

Калориметричний комплекс на базі установки ДМКИ-01 (рис. 1) функціонально об'єднує тепловий блок з вмонтованою калориметричною платформою 3, аналітичні терези 10, блок електронного регулювання 14, систему продувки повітря пневмонасосом 12 та персональний комп'ютер зі спеціально розробленим програмним забезпеченням 15. Сигнали від перетворювачів температур, перетворювачів теплового потоку і аналітичних терезів через електронний блок поступають на персональний комп'ютер 15 зі спеціально розробленим програмним забезпеченням.

Для дослідів з листям м'яти було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм. В ній перетворювачі теплового потоку розміщені вздовж периметру стінок комірок. Цілий ли-

сток м'яти скручувався у м'який рулон та вміщувався у вимірювальну комірку. Ізотермічне кондуктивне сушіння відбувалось в калориметричній камері при температурах 40 та 50 °С до моменту досягнення матеріалом вологості, що рівноважна з повітрям всередині камери.

Результати досліджень

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма адсорбції пари води листям м'яти при температурі 30 °С, яка має форму, характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів (рис. 2). Використовуючи метод характеристичних кривих, заснований на потенційній теорії сорбції, за цією ізотермою визначені значення рівноважних вологовмістів для 40 та 50 °С.

Ізотерми відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води), де можна виділити три інтервали p/p_s за взаємодією води з матеріалом та її активністю в біохімічних реакціях. У інтервалі p/p_s від 0 до 0,2 (вологовміст матеріалу нижче 10 %) вода міцно зв'язана і не доступна для біохімічних реакцій. У інтервалі p/p_s від 0,2 до 0,7 вода адсорбційно зв'язана і доступна для реакцій неферментативного

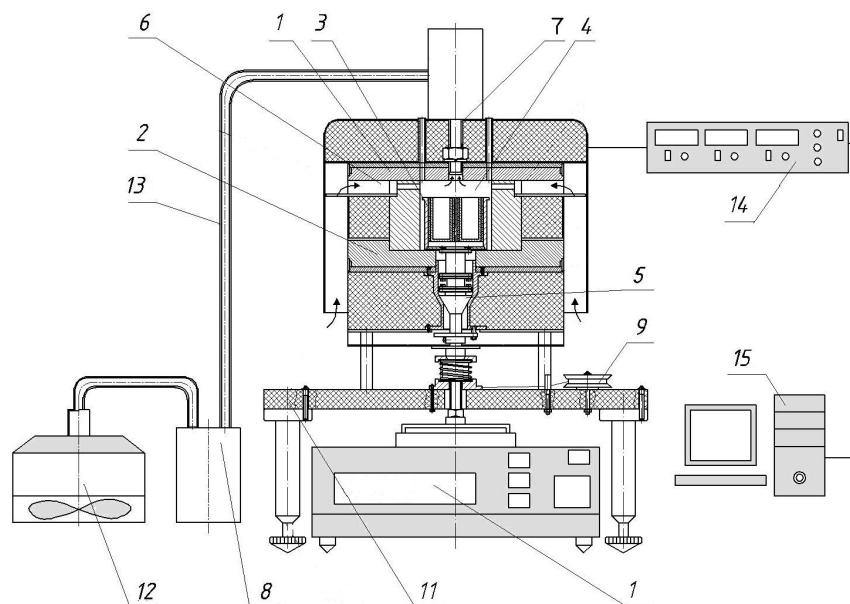


Рис. 1. Принципова схема установки ДМКИ-01.

- 1,2 – верхній і нижній термостатовані кожухи теплового блока;
 3 – калориметрична платформа з глибокими комірками; 4 – робоча камера;
 5 – коаксіальна стойка; 6 – радіальні канавки для току повітря;
 7 – фланець з трубою для відведення вологого повітря; 8 – сепаратор; 9 – аретир;
 10 – аналітичні терези; 11 – стіл з опорами, які регулюються; 12 – пневмонасос;
 13 – гнучка трубка; 14 – електронний блок; 15 – ПК з програмним забезпеченням

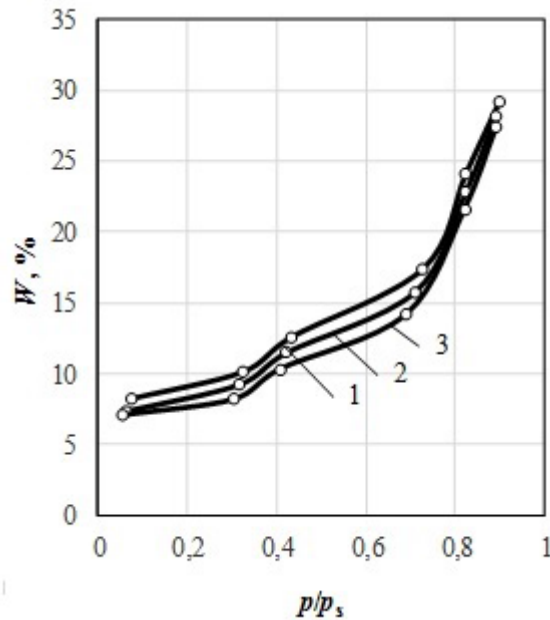


Рис. 2. Ізотерми адсорбції пари води м'ятою перцевою: 1 – 30 °C; 2 – 40 °C; 3 – 50 °C

потемніння, в цьому інтервалі вологовміст матеріалу становить 10...16 %. У інтервалі p/p_s від 0,7 до 1 вода слабо зв'язана капілярними силами і доступна як для розвитку мікроорганізмів, так і для хімічних реакцій. За ізотермами адсорбції встановлюємо, що для запобігання мікробного псування вологовміст висушеної м'яти не повинен перевищувати 16 %, при вологовмісті меншому ніж 10 % унеможливаються будь-які біохімічні реакції.

За ізотермами адсорбції визначають тепловологісні параметри сушильного агента, при яких можливо провести досушування м'яти перцевої до заданого залишкового вологовмісту. В кліматичних умовах України влітку в період збирання та переробки м'яти перцевої вологовміст атмосферного повітря коливається в широкому діапазоні від 8 до 20 г/кг с.п. У разі традиційного конвективного сушіння такі коливання вологовмісту повітря, що надходить до сушарки, приводять до коливання вологості сушильного агента. Так, при температурі сушильного агента 40 °C його вологість буде змінюватись згідно $H-d$ діаграмі вологого повітря в діапазоні від 18 до 42 %, таким умовам відповідає рівноважний вологовміст матеріалу в межах 8...12 %. При 50 °C вологість сушильного агента змінюється від 10 до 25 %, а рівноважний вологовміст – в межах 7...8 %. Аналіз гігротермічної рівноваги м'яти перцевої показав, що при температурі 40 °C і високій відносній вологості більше ніж 38 % сушильного агента не можливо досушити м'яту до заданого залишкового вологовмісту 10 %, тому що матеріал приходить до стану рівноваги

з сушильним агентом раніше, і процес зневоднення припиняється. Таким чином, на заключному етапі сушіння під час видалення адсорбційно-зв'язаної вологи вологовміст сушильного агента при температурі 40 °C не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

У разі видалення зв'язаної вологи загальні витрати енергії на випаровування визначаються ізостеричною теплою адсорбції q_{st} , яка складається з питомої теплоти паротворення r і чистої теплоти адсорбції q_a . Ізостерична теплота адсорбції q_{st} розраховується за рівнянням Клаузіуса-Клапейрона [12]:

$$\left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln T}\right) = \frac{q_{st}}{RT^2}.$$

Використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона, визначаємо чисту теплоту адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням

$$q_a = \left[\ln \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] R$$

За ізотермами адсорбції листя м'яти при різних температурах розраховані ізостери, що відображають взаємозв'язок рівноважних температур і відносного тиску при постійному вологовмісті матеріалу, за якими визначалась чиста ізостерична теплоти адсорбції q_a .

На рис. 3 наведена залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції, що розрахована для температури 40 °С, від вологовмісту матеріалу. Як видно, теплота адсорбції в області слабо зв'язаної води поступово зростає із зменшенням вологовмісту, в діапазоні від 24 до 20 % спостерігається зниження теплоти, що пов'язане з впливом на випаровування води летких речовин ефірної олії м'яти. Далі теплота адсорбції різко збільшується в області адсорбційно-зв'язаної води. Питомою теплотою випаровування q слабо зв'язаної води незначно перевищує теплоту паротворення. Витрати ж енергії на випаровування адсорбційно-зв'язаної води збільшуються при досягненні матеріалом вологовмісту 12 % на 29 % в порівнянні з теплотою паротворення вільної води, тобто відношення $q/r = 1,29$.

В реальному процесі сушіння одночасно з водою з поверхні листка м'яти випаровуються леткі ефірні олії. В природі ефірні олії виконують таку важливу функцію як регулювання транспірації та захисту рослин від перегрівання вдень, переохолодження вночі. Багато компонентів ефірних олій, які особливо інтенсивно виділяються в атмосферу саме в спекотну погоду, мають високу теплоту випаровування, що дієво запобігає перегріванню тканин. Для м'яти перцевої такий вплив може чинити основний леткий ароматичний компонент ефірної олії (30–55 %) – (-)-Ментол (l-ментол чи (1R,2S,5R)-ментол). За фізичними властивостями ментол – це безбарвні шестикутні кристали, як правило, голчасті або у вигляді кристалічного порошку з приємним м'ятним запахом. Його температура плавлення при нормальних умовах становить 315,60 К (42,5 °С), а ентальпії випаровування та сублімації ста-

новлять $\Delta_{\text{vap}} H = 56,37$ кДж/моль та $\Delta_{\text{sub}} H = 95,8$ кДж/моль, відповідно [15, 16]. Друга основна летка сполука ефірної олії (14–32 %) – ментон, який являє собою безбарвну рідину з м'ятним запахом. Ентальпія випаровування ментону становить $\Delta_{\text{vap}} H = 50,1$ кДж/моль [17].

Дослідження витрат енергії на зневоднення в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої було проведено шляхом визначення змін у витратах теплоти на випаровування на диференціальному мікрокалориметрі випаровування ДМКИ-01.

Результати дослідження теплоти на випаровування в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої наведені на рис. 4 в координатах значень питомих витрат теплоти на сушіння, приведених до питомої теплоти випаровування чистої води при відповідній температурі ($R = q_{\text{витрачене}} / r_{\text{води}}$).

Експериментально отримані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурі 40 °С (рис. 4, крива 1) відповідають теплоті випаровування чистої води ($R=1$) лише на початку процесу. Очевидно, тут відбувається природна втрата води листям крізь устячка, які призначені для транспірації. Але вологість 70 % відносних стає критичною для листя. Тому до процесу випаровування води приєднується процес випаровування летких ароматичних сполук з залоз-трихом на поверхні листя. Свідченням цього є спадання величини R нижче теплоти випаровування чистої води та поява сильного аромату м'яти у повітрі, яке видаляється з калориметричної камери. Виділення летких ароматичних сполук з листя відбувається протягом всього подальшого процесу сушіння, монотонно, паралельно з видаленням вільної води.

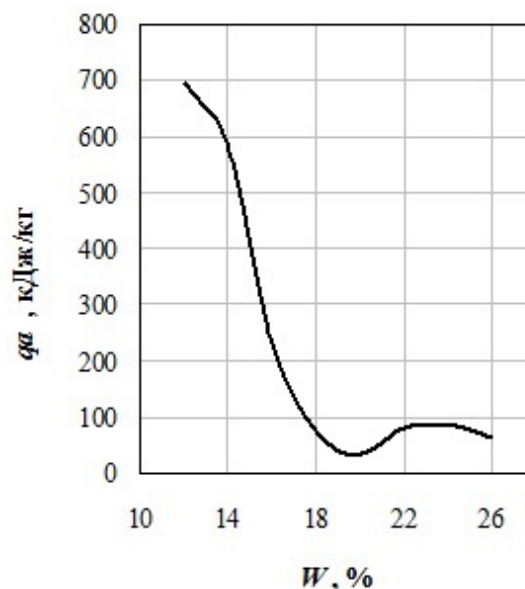


Рис. 3. Чиста ізостерична теплота адсорбції пари води м'ятою перцевою

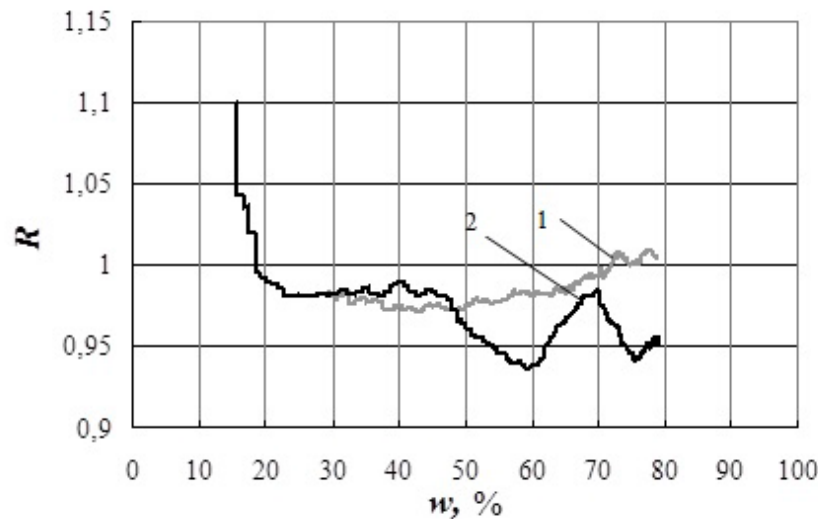


Рис. 4. Залежність від відносної вологості приведених питомих витрат теплоти на висушування листя м'яти перцевої при температурі сушіння: 1 – 40 °C; 2 – 50 °C

Експериментально отримані значення питомих витрат теплоти на висушування листя м'яти при температурі 50 °C (рис. 1, крива 2) вказують на значне випаровування летких сполук з самого початку процесу. Також, на кривій витрат теплоти спостерігаємо ендотермічні піки, можливо, обумовлені плавленням ментолу, чи випаровуванням інших ароматичних речовин (ментону, жасмону, пулегону тощо). Періодичне повернення витрат теплоти до значення теплоти випаровування чистої води може свідчити про закінчення процесу плавлення, чи про вичерпання запасів відповідної леткої сполуки. Подальша (після досягнення вологості 45 % відн.) відповідність кривої витрат теплоти при 50 °C значенням кривої витрат теплоти при 40 °C свідчить про подальше випаровування ментолу, концентрація якого в ефірних оліях м'яти найбільша. Різке зростання витрат теплоти (вище теплоти випаровування вільної води) наприкінці процесу сушіння свідчить про початок видалення з листя адсорбційно-зв'язаної води: з міжклітинних капілярів, адсорбованої біополімерами мембран та води гідратних сфер розчинених речовин. Цей момент добре погоджується з зростанням чистої ізотеричної теплоти адсорбції в області адсорбційно-зв'язаної води (рис. 3).

Висновки.

Проведені дослідження сорбційних властивостей та теплоти випаровування дозволили встановити ряд технологічних параметрів процесів сушіння і зберігання м'яти перцевої, при яких забезпечується максимальне збереження ефірних олій:

1. Для зменшення втрат ефірної олії та для запобігання дії реакцій не ферментативного потемніння м'яту необхідно сушити до залишкового вологовмісту, що не перевищує 10 %.

2. За умов сорбційної рівноваги визначені тепловологісні параметри сушильного агента при досушуванні м'яти до залишкового вологовмісту 10 %. Під час видалення зв'язаної води вологовміст сушильного агента не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

3. Визначені величини чистої ізотеричної теплоти адсорбції, за якими оцінюються мінімальні витрати енергії необхідні для процесу сушіння. Показано, що при видаленні адсорбційно-зв'язаної води питома теплота випаровування води з листя м'яти збільшується на 29 % в порівнянні з теплотою паротворення.

4. Експериментально калориметричним методом одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурах 40 і 50 °C. Виявлено вплив летких речовин ефірної олії м'яти перцевої на теплоту випаровування.

5. Вибір температури сушіння пряно-ароматичних рослин в першу чергу визначається термочутливістю ефірних олій. Дослідження впливу температури сушіння на видалення летких ароматичних сполук з листя м'яти перцевої показало, що для запобігання значних втрат якості гранично допустима температура матеріалу під час зневоднення не повинна перевищувати температуру плавлення ментолу 42,5 °C.

ЛІТЕРАТУРА

1. FAOSTAT. Режим доступу: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL>.
2. Nayak P., Kumar T., Gupta A.K. and Joshi N.U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2020. – P.1519-1528.
3. Ковальов В.М., Павлій О.І., Ісакова Т.І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. – Харків: «Прапор» НФАУ, 2000. – 704 с.
4. European Pharmacopoeia 8th Edition (Ph. Eur. 8), Council of Europe. – Strasbourg, 2014.
5. Мінарченко В.М., Бутко А.Ю. Дослідження вітчизняного ринку лікарських засобів рослинного походження // Фармацевтичний журнал. – 2017. – № 1 – С. 30-36.
6. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2021. – V. 61, I.11 – P. 1763-1786.
7. Blanco M.C.S.G., Ming L.C., Marques M.O.M., Bovi O.A. Drying temperature effects in peppermint essential oil content and composition // Acta Horticulturae. – 2000. – V. 569. – P. 95-98.
8. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Ільєнко О.О., Ловейко В.О. Сушіння м'яти на конвективних сушильних установках // Харчова промисловість. – 2010. – Вип. 9 – С. 168-170.
9. Karami H., Rasekh M., Darvishi Y., Khaledi R. Effect of Drying Temperature and Air Velocity on the Essential Oil Content of Mentha aquatica L. // Journal of Essential Oil Bearing Plants. – 2017. – V. 20, I. 4 – P. 1131-1136.
10. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 464 с.
11. Снежкін Ю.Ф., Дабіжжа Н.О., Малащук Н.С. Енергоресурсозберігаючі технології зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин // Теплофізика та теплоенергетика. – 2021. – Т. 43, №4. – С. 7-16.
12. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. Academic Press, 1982. 306 p.
13. Al-muhtaseb A.H., McMinn W.A.M., Magee T.R.A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review // Trans IChemE. – 2002. – V. 80, Part C. – P. 118-128.
14. Дмитренко Н.В., Іванов С.О., Снежкін Ю.Ф., Декуша Л.В. Дослідження теплофізичних характеристик пагонів верби за допомогою установки синхронного теплового аналізу // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, №2. – С. 77-84.
15. Chickos J.S., Garin D.L., Hitt M., Schilling G. Some solid state properties of enantiomers and their racemates // Tetrahedron. – 1981 – V. 37. – P. 2255-2259.
16. Hoskovec M., Grygarová D., Cvacka J., Streinz L., Zima J., Verevkin S., Koutek B. Determining the vapour pressures of plant volatiles from gas chromatographic retention data // Journal of Chromatography. – 2005. – V. 1083 (1-2). – P. 161-172.
17. Batiu I. Vapor-liquid equilibria in the binary systems n-decane+(-)-menthone and n-decane+(+)-fenchone at temperatures between 344,45 and 390,75 K // Fluid Phase Equilibria. – 2002. – V. 198, 1. – P. 111-121.

SORPTION AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF AROMATIC PLANTS AS DRYING OBJECTS

**Sniezhkin Yu.F.¹, Dabizha N.O.², Dmytrenko N.V.³,
Malashchuk N.S.⁴**

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>, lsnezhkin@gmail.com*

²*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-6124-1981>, dabizha.nataliia@gmail.com*

³*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-4520-4205>, natat4al@ukr.net*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8648-1006>, malashchuk_n@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.1>

The high demand for aromatic herbs in the biotechnological, cosmetic, pharmaceutical and food industries led to increased requirements for the technological processes of processing aromatic raw materials to preserve biologically active substances and essential oils. Peppermint (*Mentha piperita* L.) is a well-known medicinal essential oil crop that is widely distributed throughout Ukraine. It is widely used due to its beneficial properties and therapeutic effect on the human body.

The purpose of the article is studies of sorption and thermodynamic properties of aromatic plants to determine technological parameters of drying and storage processes, which ensure minimum specific energy consumption and maximum preservation of essential oils.

The results of study on sorption properties of peppermint leaves are presented. Adsorption moisture isotherms of peppermint leaves were determined at three different temperatures 30, 40 and 50 °C, using the standard gravimetric static method. The net isosteric heat of adsorption was calculated from moisture isotherms, using the Clausius-Clapeyron equation.

The specific heat consumption for drying peppermint leaves at temperatures of 40 and 50 °C was obtained experimentally, using the differential microcalorimeter of evaporation. The effect of volatile substances of peppermint essential oil on the heat of vaporization was revealed.

The choice of drying temperature of aromatic plants is primarily determined by the thermal sensitivity of essential oils. The study of the effect of drying temperature on the removal of volatile aromatic compounds from peppermint leaves showed that the maximum allowable temperature of the material during dehydration should not exceed the melting point of menthol at 42,5 °C.

Bibliograph. 17, figures 4.

Key words: aromatic herbs, peppermint, drying, adsorption, heat evaporation of water.

1. FAOSTAT. Access mode: <https://www.fao.org/faostat/r/#data/QCL>.

2. Nayak P., Kumar T., Gupta A.K. and Joshi N.U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2020. V. 9, I. 3. P.1519-1528. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525>.

3. Kovalov V.M., Pavlii O.I., Isakova T.I. Farmakohnoziya z osnovamy biokhimiya roslyn [Pharmacognosy with the basics of plant biochemisry]. [Kharkiv: «Prapor» NFAU], 2000. 704 p. (in Ukr.)

4. European Pharmacopoeia 8th Edition (Ph. Eur. 8), Council of Europe. Strasbourg, 2014.

5. Minarchenko V.M., Butko A.Yu. Doslidzhennya vitchyznyanoho rynku likarskykh zasobiv roslynnoho pokhodzhennya [Research of the domestic market of medicinal products of herbal origin] // [Farmatsevtichnyy zhurnal], 2017. № 1. P. 30-36. (in Ukr.)

6. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs // Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021. V. 61, I.11 P. 1763-1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.

7. Blanco M.C.S.G., Ming L.C., Marques M.O.M., Bovi O.A. Drying temperature effects in peppermint essential oil content and composition // Acta Horticulturae, 2000. V. 569. P. 95-98.

8. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Iliencko O.O., Loveiko V.O. Sushynnya myaty na konvektyvnykh sushylnykh ustanovkakh [Drying of mint on convective dryers] // [Food industry], 2010. V. 9. P. 168-17. (in Ukr.)

9. Karami H., Rasekh M., Darvishi Y., Khaledi R. Effect of Drying Temperature and Air Velocity on the Essential Oil Content of *Mentha aquatica* L. // Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2017. V. 20, I. 4. P. 1131-1136. <http://dx.doi.org/10.1080/0972060X.2017.1371647>

10. *Lykov A.V.* Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki [Heat and mass exchange in drying processes]. M.-L.: Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatelstvo, 1956. 464 p. (in Rus.)
11. *Sniezhkin Yu.F., Dabizha N.O., Malashchuk N.S.* Enerhoresursozberihayuchi tekhnolohiyi znevodnennya likars'kykh ta pryano-aromatychnykh roslyn [Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants] // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2021. V. 43, №4. P. 7-16. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.1>. (in Ukr.)
12. *Gregg S.J., Sing K.S.W.* Adsorption, surface area and porosity. Academic Press, 1982. 306 p.
13. *Al-muhtaseb A.H., McMinn W.A.M., Magee T.R.A.* Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review // *Trans IChemE*, 2002. V. 80, Part C. P. 118-128.
14. *Dmytrenko N.V., Ivanov S.O., Snezhkin Yu.F., Dekusha L.V.* Doslidzhennya teplofizychnykh kharakterystyk pahoniv verby za dopomohoyu ustanovky synkhronnoho teplovoho analizu [Research of thermal characteristics of willow shoots by device of synchronous thermal analysis] // *[Industrial heat engineering]*, 2015. V. 37, №2. P. 77-84. (in Ukr.)
15. *Chickos J.S., Garin D.L., Hitt M., Schilling G.* Some solid state properties of enantiomers and their racemates // *Tetrahedron*, 1981. V. 37. P. 2255-2259.
16. *Hoskovec M., Grygarová D., Cvacka J., Streinz L., Zima J., Verevkin S., Koutek B.* Determining the vapour pressures of plant volatiles from gas chromatographic retention data // *Journal of Chromatography*, 2005. V. 1083 (1-2). P. 161-172.
17. *Batiu I.* Vapor-liquid equilibria in the binary systems n-decane+(-)-menthone and n-decane+(+)-fenchone at temperatures between 344,45 and 390,75 K // *Fluid Phase Equilibria*, 2002. V. 198, 1. P. 111-121.

Отримано 13.04.2023

Received 13.04.2023

УДК 532.536

ПЛИН МАСТИЛА У ВУЗЬКІЙ КЛИНОПОДІБНІЙ ЩІЛИНІ З РУХОМОЮ СТІНКОЮ**Авраменко А.О.**, член-кореспондент НАН України, **Тирінов А.І.**, докт. техн. наук, **Ковецька М.М.**, канд. техн. наук, **Кондратьєва О.О.**, канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, м. Київ 03680, Україна*<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.2>*Розглянуто плин мастила у вузькій клиноподібній щілині з рухомою стінкою. Отримано рішення задачі з граничними умовами проковзування на стінках каналу. Показано вплив проковзування на зміну гідростатичної під'ємної сили і гідравлічного опору у щілинному каналі.**The flow of a lubricant in a narrow wedge-shaped slot with a movable wall is considered. A solution to the problem with boundary conditions for slippage on the channel walls is obtained. The effect of slippage on the change in hydrostatic lift and hydraulic resistance in the slotted channel is shown.*

Бібл. 16, рис. 2.

Ключові слова: мащення, вузький канал, умови ковзання, підйомна сила.

a – довжина каналу;
 L – довжина вільного пробігу молекули;
 h – висота каналу;
 p – тиск;
 u – складова швидкості в напрямку x ;
 v – складова швидкості в напрямку y ;
 x, y – Декартові координати;

μ – динамічна в'язкість;
 τ – напруга тертя;
 K_n – число Кнудсена.
Індекси:
 0 – значення параметру поза каналом;
 w – значення параметру на стінці.

В даний час в енергетичній, газодобувній, аерокосмічній галузі промисловості широко використовуються підшипники на газовому мащенні. [1,2]. Вони використовуються у кріогенній техніці, мікротурбінах, вакуумних насосах. Розробляються математичні моделі плинну газу у вузьких криволінійних каналах з рухомими стінками при в'язкісному режимі плинну газу для дослідження впливу геометричних та динамічних параметрів на відкачувану характеристику вакуумних насосів [3,4]. Показано, що математична модель, що заснована на системі рівнянь Нав'є-Стокса, з умовами прослизання на стінках каналу працює навіть в умовах, близьких до умов молекулярного потоку. У роботах [5-12] надано результати теоретичних досліджень потоків у мікроканалах різної геометрії. Розглянуто проблеми моделювання таких течій з урахуванням умов ковзання на стінках каналів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень режимів мащення в мікропорожнинах представлені в роботах [13,14]. Отримано розподіл гідродинамічних характеристик мікропотоку. У роботі [15] досліджувалися течії двофазної суміші нафти та води у мікроканалах. Виявлено сильну залежність

падіння тиску в мікроканалі від матеріалу стінок та умов взаємодії потоку зі стінками, проаналізовано різні схеми течії двофазних потоків. Короткий огляд робіт показав, що дослідження течії рідини в каналах за умови прослизання на стінках актуальні в теорії мащення різних технічних пристроїв та мікроканалних систем. У статті розглянута ламінарна течія мастила у вузькій клиноподібній щілині з рухомою стінкою, яка характерна для нагнітальної області течії мастила в підшипниках ковзання.

Математична модель

Вирішення задачі плинну мастила в тонкій щілині з граничними умовами прилипання рідини до обмежуючих поверхонь було отримано О. Рейнольдсом [16]. У статті надається рішення цієї задачі з урахуванням граничних умов прослизання рідини на стінках щілинного каналу. Розглядається пласка течія в'язкої рідини у вузькій щілині, нижня стінка якої рухається з постійною швидкістю U у напрямку від широкої частини щілини до вузької (рис.1).

Кут розкриття щілини передбачається малим, що дозволяє використовувати наближення мікроканалу по всій довжині та не враховувати поперечну швидкість

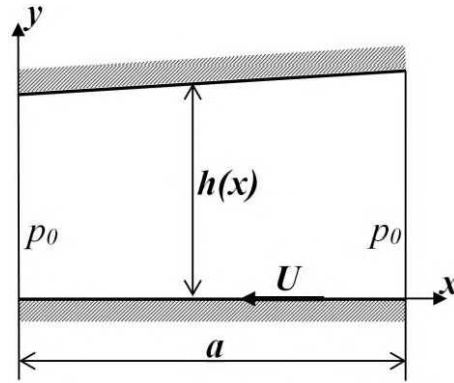


Рис. 1. Схема розрахункової області

плину рідини. Висота вхідного та вихідного перерізу щілини позначається через h_i і h_o , а поточна висота щілини визначається співвідношенням

$$h(x) = h_0 \left(1 + k \frac{x}{a} \right), \quad (1)$$

де k – постійний коефіцієнт.

Тонкість щілини і непроникність стінок, що обмежують щілину дозволяє вважати поперечну швидкість v дуже малою в порівнянні з поздовжньою швидкістю u . Нехтуючи також конвективними членами рівняння руху, запишемо систему рівнянь Нав'є-Стокса для стаціонарної течії в клиноподібній щілині у такому вигляді

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (3)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y}, \quad (4)$$

Відповідні граничні умови

$$u = -U + L \frac{\partial u}{\partial y}, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = 0, \quad (5)$$

$$u = -L \frac{\partial u}{\partial y}, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = h, \quad (6)$$

$$p = p_0, \quad \text{при} \quad x = 0 \quad \text{і} \quad x = a, \quad (7)$$

де L – довжина вільного пробігу молекули або, іншими словами, довжина ковзання. При цьому умова (7) відповідає вирівнюванню тиску поза клином [16].

Рівняння (4) показує, що тиск є лише функцією координати x . В результаті інтегрування рівняння (3) двічі з урахуванням граничних умов (5) та (6) отримуємо профіль швидкості

$$u = -U \frac{h + L - y}{h + 2L} + \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - h(y + L)), \quad (8)$$

або в безрозмірному вигляді

$$W = -\frac{1 + \text{Kn}_h - Y}{1 + 2\text{Kn}_h} + A(Y^2 - Y - \text{Kn}_h), \quad (9)$$

де $W = u/U$, $Y = y/h$, параметр A є функцією координати x

$$A = \frac{h^2}{2\mu U} \frac{dp}{dx}. \quad (10)$$

Визначимо витрати у каналі як

$$\int_0^h u dy \sim \text{const}. \quad (11)$$

Підстановка рівняння (8) у рівняння (11) дає

$$hU + \frac{dp}{dx} \frac{h^2(h + 6L)}{6\mu} = \text{const}. \quad (12)$$

Виходячи з граничної умови (7), у проміжній точці з абсцисою x_m в інтервалі $0 < x_m < a$ повинно виконуватися умова $dp/dx=0$. Вводячи позначення $h=h_m$ при $x=x_m$, можливо знайти з рівняння (12)

$$h_m U = \text{const.} \quad (13)$$

Виключивши константу з рівнянь (12) та (13), можна отримати

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6U\mu(h_m - h)}{h^2(h + 6L)}. \quad (14)$$

Інтегрування рівняння (14) з урахуванням (1) дає

$$p = \frac{aU\mu \left(h(h_m + 6L) \ln \left(1 + 6 \frac{L}{h} \right) (h_m + 6L) - 6h_m L \right)}{6kh_0 h L^2} + C_1. \quad (15)$$

$$h_m = \frac{6h_0(1+k)Kn \ln \left(\frac{(1+k)(1+6Kn)}{1+k+6Kn} \right)}{6kKn + (1+k) \ln \left(\frac{1+k+6Kn}{(1+k)(1+6Kn)} \right)}, \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{6k^2 p_0 Kn - \left(k(1+k)p_0 - 6 \frac{aU\mu}{h_0^2} \right) \ln(1+6Kn) + (1+k) \left(kp_0 - 6 \frac{aU\mu}{h_0^2} \right) \ln \left(1 + \frac{6Kn}{1+k} \right)}{k \left(6kKn + (1+k) \ln \left(\frac{1+k+6Kn}{(1+k)(1+6Kn)} \right) \right)}, \quad (17)$$

де $Kn = \frac{L}{h_0}$ – число Кнудсена в локальній координаті з висотою h_0 .

Підстановка рівнянь (16) та (17) до рівняння (15) з урахуванням рівняння (1) дає

$$P = \frac{\left(1+k+6B \frac{1-X}{1+kX} \right) \ln(1+6Kn) - (1+k) \left(1-6B \frac{X}{1+kX} \right) \ln \left(1 + \frac{6Kn}{1+k} \right) - 6 \left(kKn + B \ln \left(1 + \frac{6Kn}{1+kX} \right) \right)}{(1+k) \ln \left(\frac{(1+k)(1+6Kn)}{1+k+6Kn} \right) - 6kKn} \quad (18)$$

де

$$P = \frac{p}{p_0}, \quad B = \frac{aU\mu}{h_0^2 p_0}, \quad X = \frac{x}{a}$$

З рівнянь (1) і (16) можна отримати співвідношення для координати x_m

$$X_m = \frac{1}{k} \left(\frac{6(1+k)Kn \ln \left(\frac{(1+k)(1+6Kn)}{1+k+6Kn} \right)}{6kKn + (1+k) \ln \left(\frac{1+k+6Kn}{(1+k)(1+6Kn)} \right)} - 1 \right), \quad (19)$$

Аналіз рівняння (18) показує, що зі зростанням інтенсивності прослизання (зростання числа Kn) зміна тиску слабшає. Це зумовлено ослабленням взаємодії потоку зі стінкою. Внаслідок чого зменшується гідравлічний опір. У граничному випадку $Kn \rightarrow 0$ рівняння (18) перетворюється на наступне співвідношення

$$P = 1 + \frac{k(1-X)X}{(2+k)(1+kX)^2}, \quad (20)$$

яке було отримано Рейнольдсом [16] для граничних умов прилипання. Те саме є правильним для рівняння (19). При $Kn \rightarrow 0$, це рівняння переходить у наступне співвідношення [16]

$$X_m = \frac{1}{2+k} \quad (21)$$

На різних ділянках течії ефект прослизання по-різному впливає на профіль швидкості (9). З рівняння (9) випливає, що профіль швидкості має екстремум у точці

$$Y_m = \frac{A(1+2Kn)-1}{2A(1+2Kn)}. \quad (22)$$

Для течії без ефектів прослизання екстремум розташований на стінці, що рухається при $A = 1$ і на нерухомій стінці при $A = -1$. При збільшенні абсолютного значення параметра A точка Y_m зміщується від стінки до ядра потоку. При $Kn > 0$ ця тенденція посилюється, тобто точка екстремуму за умови $A = \text{idem}$ сильніше зміщується від стінки. Це пов'язане з ослабленням взаємодії потоку зі стінкою. Поява екстремуму також залежить від значення числа Кнудсена. Чим більше це значення, тим нижче абсолютні значення параметра A де з'являється екстремум. Це значення можна визначити за рівнянням

$$A = \begin{cases} \frac{1}{1+2Kn} & A > 0 \\ -\frac{1}{1+2Kn} & A < 0 \end{cases}. \quad (23)$$

Рівняння (22) має асимптоту, яка залежить від значення числа Кнудсена $\lim_{A \rightarrow \pm\infty} Y_m = \frac{1}{2}$,

Тобто при конфузорному плинні (параметр $A > 0$) екстремум лежить у діапазоні $Y_m = 0 \dots \frac{1}{2}$, а при дифузорному плинні (параметр $A < 0$) $Y_m = \frac{1}{2} \dots 1$.

Силові характеристики

Вираз для визначення сили R , спрямованої вздовж осі y і яка підтримує верхню стінку каналу, записується в наступному розмірному вигляді

$$R = \int_0^a (p - p_0) dx,$$

або в безрозмірному вигляді

$$\frac{R}{ap_0} = S = \int_0^1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) d\left(\frac{x}{a} \right) = \int_0^1 (P - 1) dX. \quad (24)$$

$$S = \left[\frac{6B \ln(1+k) \left(-k - (1+k) \ln(1+6Kn) + (1+k) \ln \left(1 + \frac{6Kn}{1+k} \right) \right) +}{k \left(- (k+k^2+36BKn) \ln(1+6Kn) + k(1+k) \ln \left(\frac{(1+k)(1+6Kn)}{1+k+6Kn} \right) + \right)} \right] / \left(\frac{6B(1+6Kn) \ln(1+k+6Kn) + (-6B+k+k^2) \ln \left(1 + \frac{6Kn}{1+k} \right)}{k^2 \left(6kKn - (1+k) \ln \left(\frac{(1+k)(1+6Kn)}{1+k+6Kn} \right) \right)} \right) \quad (25)$$

При умові $Kn \rightarrow 0$ (відсутність прослизання), рівняння (25) набуває вигляду [16]

$$S_0 = \frac{6B}{k^2} \left(\ln(1+k) - \frac{2k}{2+k} \right).$$

Ця сила має максимум при $k \approx 1.2$. На рис. 2 представлена залежність відносної гідростатичної підтримуючої сили від числа Кнудсен для різних значень коефіцієнта k . Зі збільшенням числа Кнудсена величина гідростатичної підтримуючої сили зменшується. Це вочевидь, тому що в цьому випадку слабшає вплив потоку на стінку. Зі збільшенням кута розкриття каналу (або коефіцієнта k) вплив ефекту ковзання слабшає. Таким чином, потік стає вертикальнішим і прослизання більше не впливає на величину підтримуючої сили. У цьому випадку значення параметра B взагалі не впливає на значення S/S_0 .

Для визначення опору F руху нижньої стінки знайдемо спочатку напругу тертя τ

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (26)$$

Використовуючи профіль (8), отримаємо з рівняння (26)

$$\tau_w = \frac{\mu U}{h+2L} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx}. \quad (27)$$

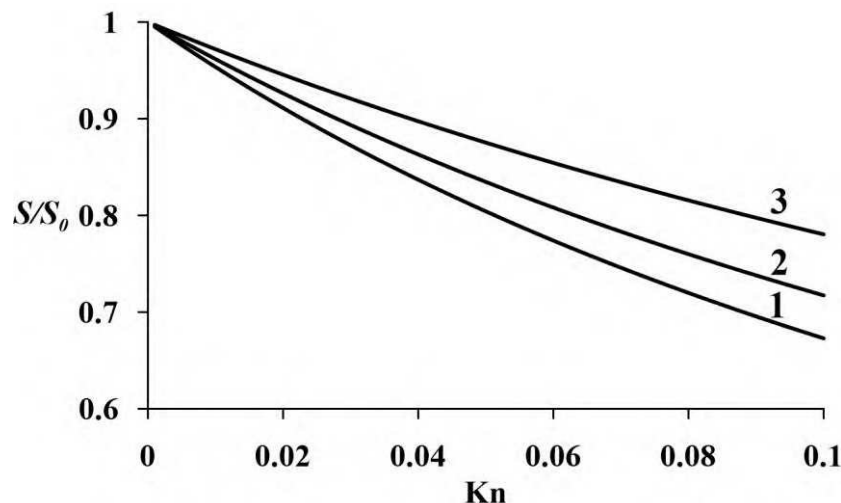


Рис. 2. Залежність відносної підтримуючої сили від числа Кнудсена: 1 – $k=0.5$; 2 – $k=1.2$; 3 – $k=3$

Підставимо сюди вирази для h (1) і для p (15) з урахуванням рівняння (17), в результаті отримаємо

$$\tau_w = \frac{\mu U}{h_0} \left[\frac{1}{1 + 2Kn + kX} + 3 \frac{6kKn(1 + kX) - (1 + k)(1 + 6Kn + kX) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right)}{(1 + k)(1 + 6Kn + kX) \left(6kKn - (1 + k) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right) \right)} \right]. \quad (28)$$

При умові $Kn \rightarrow 0$, рівняння (28) переходить у [16]

$$\tau_w = \frac{2\mu U}{h_0} \frac{2k(2 + k)X + 1 - k}{(2 + k)(1 + kX)^2}.$$

Інтегруючи рівняння (28) за координатою x від $x=0$ до $x=a$, визначимо повну силу опору руху

$$F = \left[\ln(1 + k + 2Kn) \left(6kKn - (1 + k) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right) \right) + \ln(1 + 2Kn) \left(-6kKn + (1 + k) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right) \right) - \right. \\ \left. 3 \left(6kKn \ln(1 + 6Kn) + (1 + k) \ln(1 + k) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right) - 6kKn \ln(1 + k + 6Kn) \right) \right] / \\ \left(k \left(6kKn - (1 + k) \ln \left(\frac{(1 + k)(1 + 6Kn)}{1 + k + 6Kn} \right) \right) \right) \quad (29)$$

За умовою $Kn \rightarrow 0$, рівняння (29) переходить у [16]

$$F = \frac{\mu a U}{h_0} \left(\frac{4}{k} \ln(1 + k) - \frac{6}{2 + k} \right).$$

Висновки

Робота присвячена моделюванню течії мастила в тонких щільних каналах зі стінкою, що рухається в умовах прослизання. Отримано аналітичне розв'язання задачі з урахуванням граничних умов прослизання. Показано, що зі збільшенням інтенсивності ковзання (збільшенням числа Кнудсена) зміна тиску слабшає. Вочевидь, це пов'язане з ослабленням взаємодії потоку зі стінкою. В результаті знижується гідравлічний опір.

Параметр A характеризує вплив градієнта тиску на характер течії. При позитивному значенні A тиск у напрямку потоку зменшується, характер течії конфузорний. При негативному значенні A тиск у напрямку потоку збільшується, характер течії дифузорний. При великих абсолютних значеннях параметра на профілі швидкості з'являється екстремум. Для течії без прослизання екстремум знаходиться на стінці, що рухається при $A = 1$, тоді як при $A = -1$ він знаходиться на нерухомій стінці. При збільшенні абсолютного значення параметра A точка екстремуму зміщується від стінки в ядро течії.

Отримано залежності для визначення підтримуючої сили та гідравлічного опору у щілині в залежності від числа Кнудсена та кута розкриття каналу. Визначено, що зі збільшенням числа Кнудсена величина гідростатичної підтримуючої сили зменшується, так як в цьому випадку слабшає вплив потоку на стінку. Зі збільшенням кута розкриття каналу вплив ефекту ковзання слабшає.

Робота профінансована в рамках програми наукових проектів НАН України (№ 6541230) «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» 2023–2025 (1230). Проект: «Розробка технічних засад нової вискоєфективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України».

ЛІТЕРАТУРА

1. Escudier M.P., Gouldson I.W., Oliveira P.J., Pinho F.T. Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2000, 21, 92–103
2. Siluyanova M.V., Fertikov A.O. Calculation of the lubricant flow in the plain bearing of an aircraft engine gearbox. *Samara University Bulletin. Aerodynamic engineering, geotechnology and mechanical engineering*. 2019, 18 (2) 75-88 DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-75-88 (in Russian)
3. Giors S., Colombo E., Inzoli F, Zanino R. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2006, 24 (4) 1584–1591.
4. Neto C., Evans D.R., Bonaccorso E., Butt H-J., Craig V.S.J. Boundary slip in Newtonian Liquids: a review of experimental studies. *Rep. Prog. Phys.* 2005, 68, 2859–2897 DOI: 10.1088/0034-4885/68/12/R05
5. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V. Start-up slip flow in a microchannel with a rectangular cross section. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* (2015) 29, 351–371
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00162-015-0361-x>
6. 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) 27 (4), 042001. <https://doi.org/10.1063/1.4916621>
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) 223, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.08.038>
8. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient
International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. (2010). 20(1), 111–129
DOI:10.1108/09615531011008154
9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media*. (2007). 11 (3), 241–246
DOI:10.1615/JPorMedia.v11.i3.20
10. Avramenko A.A., Kovetska Y.Y., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. Mixed convection in vertical flat and circular porous microchannels. *Transport in Porous Media*. (2018) 124(2), 919-941
DOI:10.1007/s11242-018-1104-4
11. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. Modeling of flows in a microchannel based on the Boltzmann lattice equation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* (2012) 85 (1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>
12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip flow in a channel occupied by a hyperporous medium. *Journal of Porous Media*. (2007). 10 (5), 435–442
DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20
13. Sharma H., Gaddam A., Agrawal A., Joshi S. Slip flow through microchannels with lubricant-infused bidimensional textured surfaces. *Microfluidics and Nanofluidics* (2019) p. 23-28 . <https://doi.org/10.1007/s10404-019-2197-y>
14. Xie Z., Zhang Y., Zhou J., Zhu W. Theoretical and experimental research on the micro interface lubrication regime of water lubricated bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing Volume 151*, April 2021, 107422 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107422>
15. Foroughi H. Kawaji M. Viscous oil-water flows in a microchannel initially saturated with oil: flow patterns and pressure drop characteristics. *Int. J. Multiphase Flow*. 2011, 37, 1147–1155
16. Reynolds O. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1886, 177, 157–234 Published By: Royal Society

THE FLOW OF LUBRICANT IN A NARROW WEDGE-SHAPED SLOT WITH A MOVABLE WALL IS CONSIDERED

Avramenko A.A.¹, Tyrinov A.I.², Kovetskaya M.M.³, Kondratieva E.A.⁴

¹*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine Corresponding Member of the NAS of Ukraine, ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>*

²*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Dr Sci, (Engin.) <https://orcid.org/0000-0003-2454-9113>*

³*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, PhD (Engin.) <https://orcid.org/0000-0002-8455-4689>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, PhD (Engin.)*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.2>

The article presents the results of a study of the lubricant flow in a narrow wedge-shaped slot with a movable wall. A solution to the problem with slip boundary conditions on the channel walls is obtained. The effect of slippage on the change in hydrostatic lift and hydraulic resistance in the slotted channel is shown.

It was determined in the work that with an increase in the slip intensity (an increase in the value of the Knudsen number), the pressure variation weakens. This is due to the weakening of the interaction of the flow with the wall. As a result, the hydraulic resistance is reduced.

The dependence of the relative hydrostatic lifting force on the Knudsen number and the opening angle of the channel is obtained. It is determined that with an increase in the Knudsen number, the magnitude of the hydrostatic lifting force decreases, since the influence of the flow on the wall weakens. The influence of slippage weakens with an increase in the opening angle of the channel.

References 16, figures 2.

Key words: lubricant, narrow channel, slip conditions, lifting force.

1. Escudier M.P., Gouldson I.W., Oliveira P.J., Pinho F.T. Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2000, 21, 92–103

2. Siluyanov M.V., Fertikov A.O. Calculation of the lubricant flow in the plain bearing of an aircraft engine gearbox. *Samara University Bulletin. Aerodynamic engineering, geotechnology and mechanical engineering*. 2019, 18 (2) 75–88 DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-75-88 (in Russian)

3. Giors S., Colombo E., Inzoli F., Zanino R. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2006, 24 (4) 1584–1591.

4. Neto C., Evans D.R., Bonaccorso E., Butt H-J., Craig V.S.J. Boundary slip in Newtonian Liquids: a review of experimental studies. *Rep. Prog. Phys.* 2005, 68, 2859–2897 DOI: 10.1088/0034-4885/68/12/R05

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

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00162-015-0361-x>

6. 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) 27 (4), 042001. <https://doi.org/10.1063/1.4916621>

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) 223, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.08.038>

8. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of bio-thermal convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a fluid layer with an inclined temperature gradient

International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. (2010). 20(1), 111–129

DOI: 10.1108/09615531011008154

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow in a curved porous channel with a rectangular cross section. *Journal of Porous Media*. (2007). 11 (3), 241–246

DOI:10.1615/JPorMedia.v11.i3.20

10. Avramenko A.A., Kovetska Y.Y., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. Mixed convection in vertical flat and circular porous microchannels. *Transport in Porous Media*. (2018) 124(2), 919–941

DOI:10.1007/s11242-018-1104-4

11. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. Modeling of flows in a microchannel based on the Boltzmann lattice equation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* (2012) 85 (1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>

12. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip flow in a channel occupied by a hyperporous medium. *Journal of Porous Media*. (2007). 10 (5), 435–442 DOI: 10.1615/JPorMedia.v10.i5.20

13. *Sharma H., Gaddam A., Agrawal A., Joshi S.* Slip flow through microchannels with lubricant-infused bidimensional textured surfaces. *Microfluidics and Nanofluidics* (2019) p. 23–28 . <https://doi.org/10.1007/s10404-019-2197-y>

14. *Xie Z., Zhang Y., Zhou J., Zhu W.* Theoretical and experimental research on the micro interface lubrication regime of water lubricated bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing* Volume 151, April 2021, 107422 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107422>

15. *Foroughi H., Kawaji M.* Viscous oil-water flows in a microchannel initially saturated with oil: flow patterns and pressure drop characteristics. *Int. J. Multiphase Flow*. 2011, 37, 1147–1155

16. *Reynolds O.* On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1886, 177, 157–234 Published By: Royal Society

Отримано 07.02.2023

Received 07.02.2023

УДК: 536.24:532.55

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІНІ-КАНАЛІВ, ВИКОНАНИХ
ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇХалатов А.А.,¹ академік НАН України, Борисов І.І.,¹ канд. техн. наук. Кулішов С.Б.²¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Марії Канніст, 2а, 03057, Україна²ДП НВКГ «Зоря»-Машпроект», Миколаїв, пр. Богоявленський, 42а, 54018, Україна<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.3>

Розглянуті особливості теплообміну та гідравлічного опору міні-каналів, виконаних за допомогою адитивних технологій, проведено порівняння їх теплогідравлічних характеристик.

The features of heat transfer and hydraulic resistance of additively manufactured mini-channels are considered, a comparison of their thermo-hydraulic characteristics has been carried out.

Бібл. 15, рис. 14.

Ключові слова: адитивні технології, міні-канали, шорсткість, гідравлічний опір, теплообмін, теплогідравлічна ефективність.

d_e – еквівалентний діаметр каналу;
 f – коефіцієнт гідравлічного опору;
 K_s – пісочна шорсткість;
 R_a – середньоарифметична шорсткість;
 Nu – число Нуссельта;
 Pr – число Прандтля;

Re – число Рейнольдса;
 α – кут наряду будівництва.

Скорочення:
АТ – адитивні технології.

Індекси:
0 – параметри гладкого каналу.

Вступ

Поява 3D друку, або адитивних технологій (АТ), дає можливість зробити значний крок у розробці нових високотемпературних теплообмінних пристроїв. Такі технології дозволяють не тільки реалізовувати складну геометрію теплообмінних поверхонь і каналів, але і зробити їх виготовлення більш швидким та дешевим. Ринок АТ інтенсивно розвивається, з'являються нові компанії в різних областях. Одним із напрямів АТ є лазерне спікання. Воно дозволяє створювати вироби із високотемпературних сплавів, що має суттєвий інтерес для розробників інноваційних систем охолодження високотемпературних газових турбін. АТ дозволяє створювати геометрії каналів, які до цього неможливо було реалізувати традиційними методами.

Як відмічається в роботі [1], на даний момент основна частина публікацій, присвячених морфології поверхонь, гідравлічному опору і теплообміну в міні-каналах з розмірами ~ 1 мм, виконаних за допомогою адитивних технологій (далі АТ каналів), приходить на дослідницьку команду, яка очолюється професором Карен Толе з Пенсильванського Державного Університету

(США). Важливим фактором, який стримує широкі дослідження в цьому напрямку, є унікальність устаткування як для виготовлення АТ каналів, так і для вивчення морфології виконаних зразків. В останні роки стали з'являтися і інші дослідження, в основному в США.

Структура поверхні при застосуванні адитивних технологій

Існує декілька параметрів для описання величини шорсткості. При аналізі результатів експериментів з теплообміну в АТ каналах використовують середньоарифметичну шорсткість. Спочатку вивчається мікроструктура поверхні, а потім визначається значення середньоарифметичної шорсткості по співвідношенню:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{\text{surf}} - z_{\text{ref}}| \quad (1)$$

де z_{surf} і z_{ref} – значення поточної і опорної координат.

Внаслідок використання порошку при лазерному спіканні мікроструктура виробу кардинально відрізняється від виконаного традиційними методами. При лазерному спіканні можуть утворюватися якісно інші види шорсткості [1]: частково розплавлені частин-

ки, штриховка, кульки, неповне спікання (lack of fusion), окалина. Вид шорсткості залежить від параметрів процесу будівництва виробу. Неповне розплавлення частинок порошку є наслідком недостатності енергії лазерного променя. Штриховка викликана відстанню між лазерними доріжками, даний тип шорсткості інтенсифікує теплообмін. Утворення кульок пов'язано з нестійкістю Релея всередині розплавленого матеріалу. Число кульок зростає із підвищення швидкості сканування. Неповне злиття розплавленого матеріалу має місце внаслідок недостатності енергії, яка є необхідною для цього процесу, в результаті у застиглому шарі виникають порожнини і пористість. Окалина є наслідком надмірної подачі матеріалу. Вона зазвичай виникає на нависаючих поверхнях під дією сили тяжіння. Для дослідження морфології поверхонь застосовують різні методи, зокрема комп'ютерну томографію та електронну мікроскопію.

На рис. 1 показана комп'ютерна томографія плоского каналу з суцільними циліндричними ребрами, яка наведена в роботі [2].

Результати досліджень, виконаних в роботі [3] із застосуванням електронного мікроскопу, показують, що внаслідок високого рівня шорсткості АТ технологія має ліміт по якості при зменшенні розміру каналів. Цей ліміт оцінюється розмірами ~ 1 мм. З цієї точки зору АТ технологія програє іншим, наприклад, електроерозійній технології.

В [4] показано, що прямокутні АТ канали розміром 1 мм мають розкид гідравлічного діаметра 10% і відрізняються від тих, що задані проектувальником, на 20%, в залежності від напрямку будівництва. Вироби по АТ погано піддаються контролю по розмірам. Реальні

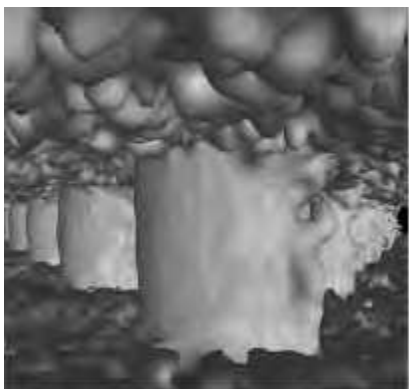


Рис. 1. Плоский АТ канал із суцільними циліндричними ребрами, комп'ютерна томографія [2]

надруковані розміри перевищують ті, що задані розробниками. Причому, периметр є ближчим до заданого, ніж прохідне січення.

Вплив параметрів процесу

В залежності від параметрів процесу лазерного спікання можна отримувати різні види шорсткості поверхні [1]. Основним параметром є потужність лазерного променя: з підвищенням енергії, що подається, шорсткість спочатку знижується, проходить через мінімум, і потім починає зростати. Іноді проводять повторне сканування для доплавлення великих утворень. Автори [1] відмічають, що до кінця фізичні процеси спікання є незрозумілими, і потрібні подальші дослідження.

Одним із основних факторів, які впливають на якість каналів, є напрям будівництва. Він визначається кутом між поверхнею порошку та віссю каналу (рис. 2). Від напрямку будівництва залежить деформація січення та шорсткість. В ряді випадків для усунення деформації вносяться коригування в комп'ютерну модель будівництва каналу.

На рис. 3 показана залежність деформації круглого каналу від напрямку будівництва [4]. Із рисунка видно, що при зміні напрямку будівництва від горизонтального до вертикального форма каналу трансформується від овальної до круглої.

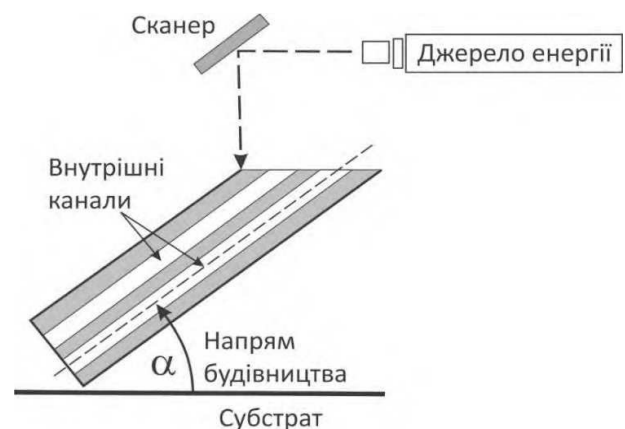


Рис. 2. Напрямок будівництва [1]

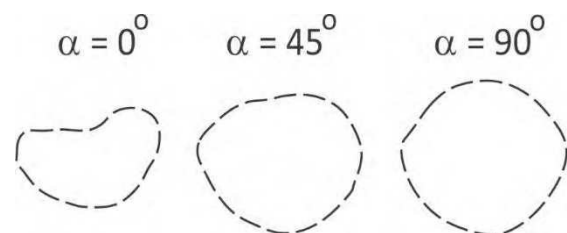


Рис. 3. Залежність геометричної деформації круглого каналу від напрямку будівництва [4]

Вимірювання шорсткості методом комп'ютерної томографії в круглому каналі діаметром ~ 1 мм при різних напрямах будівництва, показало, що вона суттєво знижується при підвищенні кута будівництва від 0° до 60° (рис. 4, а). В діапазоні від 60° до 90° вона залишається приблизно незмінною.

Теплообмін і гідравлічний опір малорозмірних АТ каналів

На даний час є невелика кількість експериментальних досліджень порівняння теплообміну та гідравлічного опору гладких каналів і каналів, виконаних АТ технологією, з постійним поперечним січенням. В [5] представлені дані по теплообміну в прямокутному АТ каналі. В [6] отримані коефіцієнти опору і теплообміну для квадратного АТ каналу з еквівалентним діаметром $0,5$ мм і середньоарифметичною шорсткістю $R_a = 20$ $\mu\text{м}$, і зроблено порівняння зі стандартними співвідношеннями для ламінарного режиму. Перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувався при $Re_d = 600$. В літературі багато даних по течії в шорстких каналах, але мало даних по каналах міліметрового розміру з високими значеннями відносної шорсткості.

Автори роботи [7] вперше дослідили гідравлічний опір та теплообмін в міліметрових АТ каналах. В експериментах [8] досліджено вплив напрямку будівництва на структуру течії. В обох дослідженнях середньоарифметична шорсткість складала $\sim 25 \mu\text{м}$. Експерименти

показали, що навіть при малих числах Рейнольдса є вплив шорсткості на гідравлічний опір та теплообмін. Було показано, що відомі співвідношення для розрахунку гідравлічного опору та теплообміну не підходять для такої високої шорсткості. В роботі [7] було проаналізовано ряд масштабних факторів, і було зроблено висновок, що краще за все для узагальнення даних підходить значення середньоарифметичної шорсткості R_a . С підвищенням шорсткості інтенсифікація опору та теплообміну зростає. Перехід відбувається при $700 < Re < 2000$, інтенсифікація теплообміну узгоджується з інтенсифікацією гідравлічного опору.

Наведена в роботі [1] залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення опору (рис. 5) показує значний розкид даних. Це, в першу чергу, пов'язано з недостатньою прогнозованістю якості та величини шорсткості. Можна бачити тенденцію, що після досягнення певного рівня f/f_0 інтенсифікація теплообміну перестає зростати.

Вплив напрямку будівництва на гідравлічний опір та теплообмін

Оскільки структура поверхонь каналів суттєво залежить від напрямку будівництва, даний фактор також вносить суттєвий внесок у гідравлічний опір та теплообмін. На рис. 4 б, в наведено залежності факторів підвищення гідравлічного опору та інтенсифікації теплообміну від напрямку будівництва при $Re = 20000$ [4]. Як вид-

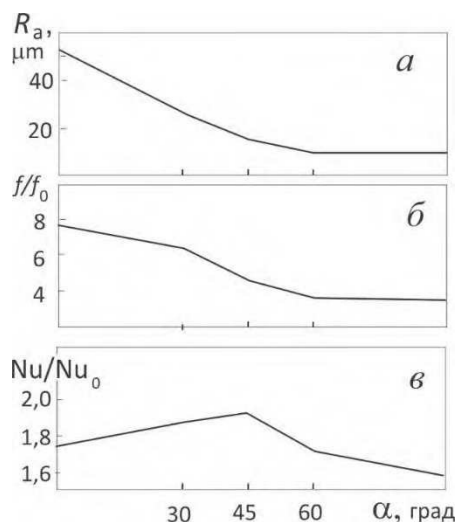


Рис. 4. Вплив напрямку будівництва на середньоарифметичну шорсткість (а), фактор підвищення опору (б) та інтенсифікацію теплообміну (в) для $d_e = 1$ мм, $Re = 20000$ [4]

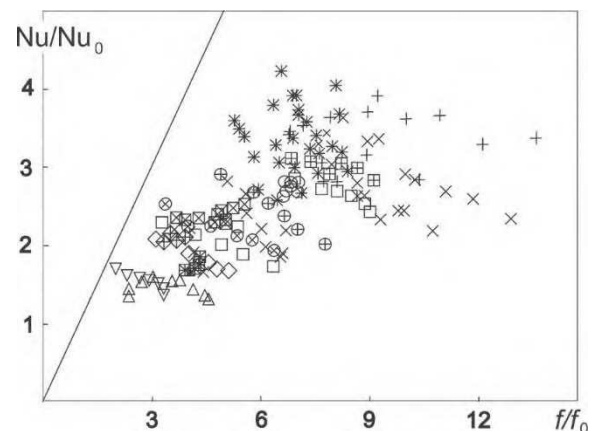


Рис. 5. Залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення гідравлічного опору для АТ каналів квадратного та круглого перерізів [1]. Лінія – аналогія Рейнольдса

но із рисунка, з підвищенням кута будівництва фактор підвищення опору монотонно знижується, а фактор інтенсифікації теплообміну має максимум в діапазоні від 30° до 45° . Оскільки зі зростанням кута величина шорсткості знижується, максимум теплообміну можна пояснити зміною виду шорсткості. Це вказує на необхідність детального вивчення морфології поверхні, рівня сплавлення частинок з поверхнею, який впливає на процес передачі теплоти теплопровідністю. Даний результат дозволяє отримувати канали з підвищеною теплогідралічною досконалістю.

Співвідношення для розрахунку гідравлічного опору і теплообміну в АТ каналах

В [9] запропоновано співвідношення для розрахунку гідравлічного опору та теплообміну в АТ каналах. Досліджувались канали прямокутного перерізу, виконані при напрямі $\alpha = 45^\circ$, з еквівалентним діаметром від 0,4 до 1,26 мм, з відносною шорсткістю R_a/d_e до 0,025. Розглядалися різні характерного розміру шорсткості, і в результаті було вибрано середньоарифметичну шорсткість R_a , яка дає найменший розкид даних.

Для розрахунку гідравлічного опору використано співвідношення Колбрука для гідравлічного опору при турбулентному режимі з урахуванням пісочної шорсткості K_s :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \cdot \lg \left(\frac{K_s/d_e}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

При підстановці в це співвідношення експериментальних даних по коефіцієнту гідравлічного АТ каналів були визначені «віртуальні» значення пісочної шорсткості K_s і зіставлені з вимірними значеннями середньоарифметичної шорсткості. В результаті була отримана емпірична залежність, яка зв'язує пісочну та середньоарифметичну шорсткість:

$$\frac{K_s}{d_e} = 18 \frac{R_a}{d_e} - 5 \quad (3)$$

Дане співвідношення пригодно при $R_a/d_e > 0,028$. Таким чином, використовуючи співвідношення (2) и (3), можна розраховувати коефіцієнт гідравлічного опору АТ каналів.

Для відомого коефіцієнту гідравлічного опору в роботі [9] запропоновано співвідношення для розрахунку теплообміну в АТ каналах:

$$\text{Nu} = \frac{(\text{Re}^{0,5} - 29) \cdot \text{Pr} \cdot \sqrt{f/8}}{0,6 \cdot (1 - \text{Pr}^{2/3})} \quad (4)$$

Розрахунок по співвідношенням (2--4) дає розкид даних до 30%, і співвідношення (3) потребує подальшого уточнення. Крім цього, воно розроблено лише для прямокутного каналу з напрямом будівництва 45° . В роботі [1] дається уточнене співвідношення:

$$\frac{K_s}{d_e} = 11 \frac{R_a}{d_e} \quad (5)$$

Воно дозволяє знизити середню погрішність розрахунку до величини $\pm 12\%$.

Дослідження різних форм каналів

З появою адитивних технологій розробники отримали значно більшу свободу в проектуванні систем охолодження у порівнянні з традиційним литтям. Виникла необхідність у більш детальному дослідженні різних форм каналів, зокрема, багатокутних, яким до цього часу не приділялось багато уваги. Форма каналу впливає на вторинні течії, які призводять до відмінності теплообміну і опору.

В дослідженнях [11] отримані дані по втратах тиску і теплообміну в прямих каналах з круглим, гексагональним, п'ятикутним, еліптичним, ромбічним, прямокутним, трапецеподібним, трикутним поперечними січеннями з однаковим периметром. Також вивчалась морфологія поверхонь, з використанням комп'ютерної томографії. Середньоарифметична шорсткість змінювалась від $5 \mu\text{m}$ до $30 \mu\text{m}$. На горизонтальних поверхнях вона була суттєво вищою, ніж на вертикальних. Відношення R_a/d_e складало величину $0,0037 \dots 0,015$.

Найбільший теплообмін показали канали квадратного і трапецеподібного перерізу. Залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення гідравлічного опору (рис. 7) показує, що еліпс, ромб, круг, шестикутник та п'ятикутник мають менший опір при такому ж числі Нуссельта, як у прямокутника та трикутника.

Всі варіанти знаходяться у проміжку між ромбом та квадратом, Еліпс, шестикутник, круг, ромб і п'ятикутник при тому ж числі Нуссельта, що у прямокутника і трикутника, мають більш низький опір.

В роботі [11] досліджувались хвилеподібні по довжині АТ канали прямокутного поперечного перерізу, з різною довжиною хвилі (рис. 7, а). Відносна шорсткість R_a/d_e складала $0,015 \dots 0,018$.

Такі канали дозволяють суттєво інтенсифікувати теплообмін (рис. 8) – у 2 рази у порівнянні з прямими АТ каналами. Запропоновані також переривчасті хвилеподібні канали (рис. 7, б) [1], з метою покращення теплогідралічної характеристики.

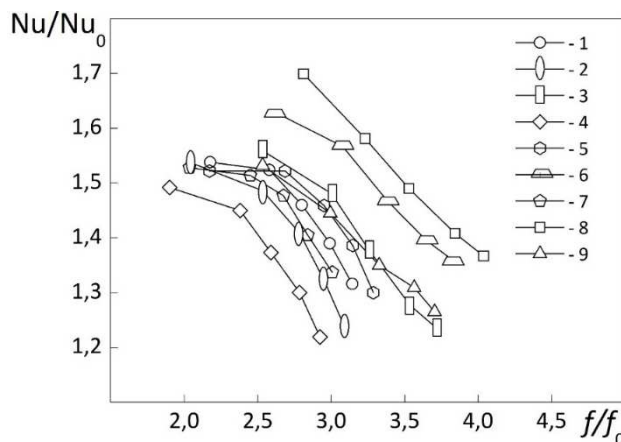


Рис. 6. Інтенсифікація теплообміну в залежності від фактору підвищення опору у прямих каналах різного поперечного перерізу [10]:

1 – круг; 2 – еліпс; 3 – прямокутник; 4 – ромб; 5 – шестикутник;
6 – трапеція; 7 – п'ятикутник; 8 – квадрат; 9 – трикутник

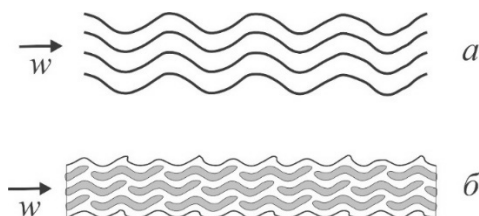


Рис. 7. Хвилеподібні канали (а) [12], та переривчасті хвилеподібні канали (б) [1]

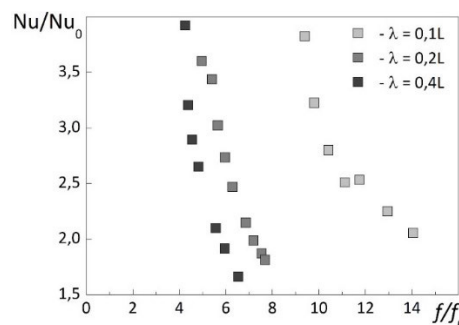


Рис. 8. Інтенсифікація теплообміну у хвилеподібних каналах (рис. 7,а) в залежності від фактору підвищення опору [11]

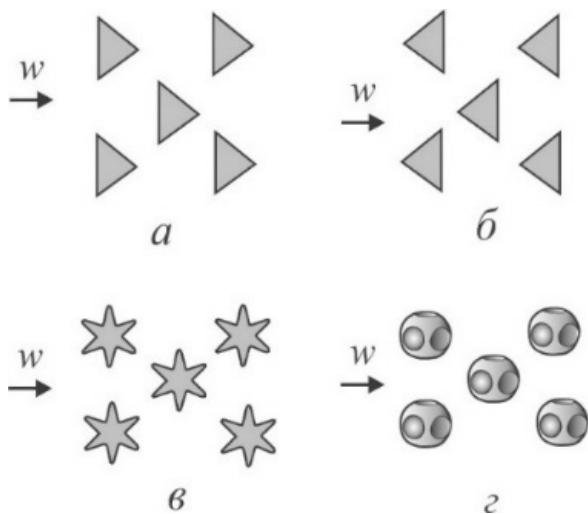


Рис. 9. АТ канали з ребрами трикутного перерізу (а, б), перерізу у вигляді зірки (в), а також у вигляді сфери з лунками (г) [12]

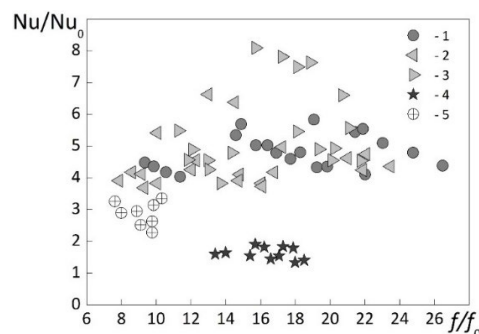


Рис. 10. Інтенсифікація теплообміну в каналах з ребрами різного перерізу [12]: 1 – круглі циліндричні ребра; 2 – ребра трикутного перерізу з вершиною до потоку; 3 – ребра трикутного перерізу гранню до потоку; 4 – ребра з перерізом у вигляді зірки; 5 – ребра сферичної форми з лунками

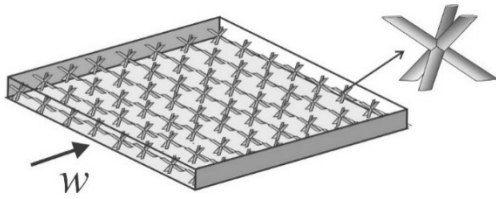


Рис. 11. Плоский АТ канал з решіткою всередині

Канали з суцільними ребрами і з внутрішньою решіткою

В роботі [2] досліджувались АТ канали з суцільними циліндричними ребрами круглого перерізу (рис. 1), а в [12] – с циліндричними ребрами трикутного перерізу, перерізу у вигляді зірки, а також сферичних ребер з лунками на поверхні сфери (рис. 9). Реалізовані на практиці дані складні геометрії показують широкі можливості адитивних технологій, які є недосяжними для традиційних методів. Такі канали дозволяють досягати дуже високої інтенсифікації теплообміну (рис. 10).

В роботі [14] досліджувались плоскі АТ канали з внутрішніми гратчастими структурами (рис. 11) двох типів, які відрізняються ступенем загромодження каналу.

На рис. 12 показана залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення опору для АТ каналів з двома різними варіантами внутрішньої решітки – зменшим та більшим рівнями загромодження перерізу. Як видно із рисунка, такі канали забезпечують високий рівень інтенсифікації теплообміну, але мають дуже високі гідравлічні втрати.

Теплогідравлічна характеристика АТ міні-каналів

На рис. 13 приведена залежність параметра аналогії Рейнольдса від фактору підвищення опору для АТ каналів. Як видно із рисунка, прямолінійні канали всіх досліджених форм укладаються на одну залежність, яка є близькою до нижньої граничної кривої, яка описує обтікання поперечних ребер при високих числах Рейнольдса [14]. Такі канали мають порівняно низький гідравлічний опір.

Дані по каналам з суцільними ребрами мають великий розкид. Ряд точок знаходиться вище верхньої граничної лінії, побудованої для каналів, виконаних по традиційним технологіям, і які мають звичайний, характерний для таких технологій, рівень шорсткості поверхні [15].

Можна також відмітити дані по хвиляподібним каналам, які при низьких числах Рейнольдса знаходяться вище верхньої граничної лінії.

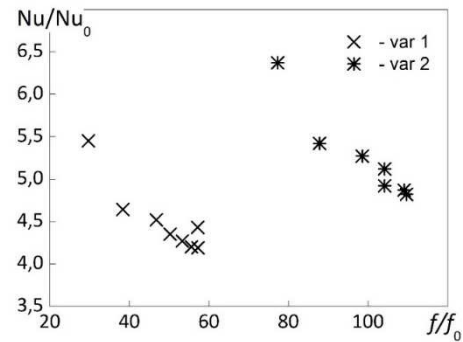


Рис. 12. Інтенсифікація теплообміну в залежності від фактору підвищення опору в каналах з внутрішньою решіткою [13]

Висновки

При лазерному синтезі можуть утворюватися різні види шорсткості, вид шорсткості залежить від технологічних параметрів процесу виготовлення виробу. Адитивна технологія має ліміт по якості внаслідок високого рівня шорсткості, цей ліміт оцінюється розмірами ~ 1 мм.

Основним параметром процесу є потужність лазерного променя: з підвищенням енергії, що подається, шорсткість спочатку знижується, проходить через мінімум, а потім починає зростати.

Одним із основних факторів, які впливають на якість каналів, є напрям будівництва. Від нього залежить ступінь деформації каналу та рівень шорсткості. Шорсткість суттєво знижується при підвищенні кута будівництва від 0 до 60° . В діапазоні від 60° до 90° вона залишається приблизно незмінною.

Відомі співвідношення для розрахунку гідравлічного опору і теплообміну не підходять для такої високої шорсткості. Дані по коефіцієнту опору АТ каналів показують, що навіть при малих числах Рейнольдса має місце внесок шорсткості. С підвищенням шорсткості інтенсифікація опору і теплообміну зростає. Перехід виникає при $700 < Re < 2000$.

Коефіцієнт опору АТ каналів суттєво вищий за коефіцієнт опору гладких каналів. Інтенсифікація теплообміну у хвиляподібних каналах у 2 рази перевищує інтенсифікацію у прямих каналах.

Канали з суцільними ребрами дозволяють досягати дуже високої інтенсифікації теплообміну (до 8).

Канали с внутрішніми решітками забезпечують високу інтенсифікацію, але мають найбільш високі гідравлічні втрати.

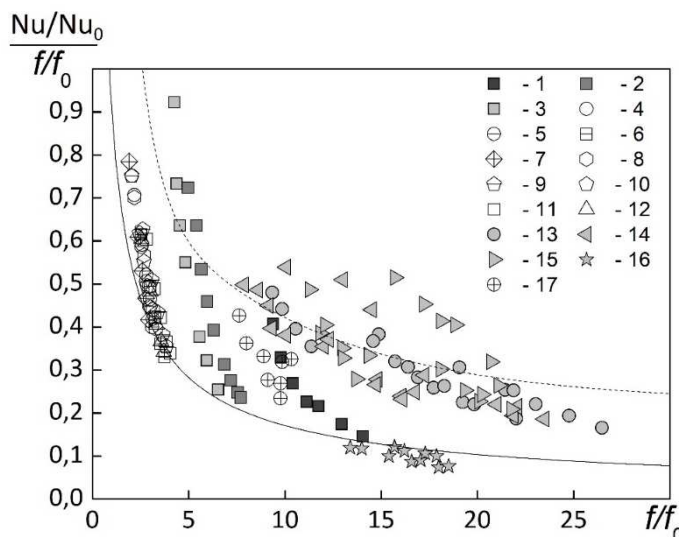


Рис. 13. Залежність параметра аналогії Рейнольдса від фактора підвищення опору для АТ каналів:
1 – 3 – хвилеподібні канали [13] з різною довжиною хвилі; 6 – 12 – прямолінійні канали з різними перерізами [11]; 13 – 17 – канали з суцільними ребрами різного перерізу [12]: 13– круглі циліндричні ребра; 14 – ребра трикутного перерізу з вершиною до потоку; 15 – ребра трикутного перерізу з гранню до потоку; 16 – ребра с перерізом у вигляді зірки; 17 – ребра сферичної форми з лунками. Нижня лінія – залежність із роботи [14] для обтікання поперечних ребер при високих числах Рейнольдса. Верхня гранична лінія – дані роботи [15] для каналів з низькою шорсткістю

Порівняння залежності фактору аналогії Рейнольдса від фактору підвищення опору показала, що прямолінійні канали всіх досліджених форм укладаються на одну залежність, яка є близькою до нижньої граничної лінії, і мають низький гідравлічний опір.

Дані по каналам з суцільними ребрами мають великий розкид. Ряд точок знаходиться вище верхньої граничної лінії, побудованої для каналів, виготовлених за допомогою традиційних технологій, і які мають низький рівень шорсткості

ЛІТЕРАТУРА

1. Thole, K. A., Lynch, S., Wildgoose, A. J. (2021) Review of Advances in Convective Heat Transfer Developed through Additive Manufacturing,” Adv. Heat Transf., 53, p. 249-325 <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2021.06.004>
2. Kirsch, K. L., and Thole, K. A. (2017) Pressure Loss and Heat Transfer for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. Int. J. Heat Mass Transfer, 108 (Pt. B), p. 2502–2513.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095>

3. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2018) Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes, J. Turbomach. 140 (1) 1–11. 011009. <https://doi.org/10.1115/1.4038182>
4. Wildgoose, A. J., Thole K.A., Sanders P. L., Wang L. Impact of additive manufacturing on internal cooling channels with varying diameters and build directions, J. Turbomach. 143 (7) (2021) 1–11. 071003. <https://doi.org/10.1115/1.4050336>
5. Parbat S.N., L. Yang L., Min, Z., M.K. Chyu M.K. (2019) Experimental and numerical analysis of additively manufactured coupons with parallel channels and inline wall jets, J. Turbomach. 141 (6) 1–10. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4041821>
6. Collins I.L., Weibel J.A., Pan L., Garimella S.V. Experimental characterization of a microchannel heat sink made by additive manufacturing, in: Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITHERM 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 171–177. Doi:10.1109/ITHERM.2018.8419588
7. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Roughness effects on flow and heat transfer for additively manufactured channels, J. Turbomach. 138 (5) (2016) 051008. DOI:10.1115/1.4032167

8. *Snyder J.C., Stimpson C.K., Thole K.A., Mongillo D.* (2016) Build direction effects on additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) 051006. <https://doi.org/10.1115/1.4032168>
9. *Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D.* (2017) Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 139 (2) 021003. <https://doi.org/10.1115/1.4034555>
10. *Wildgoose A.J., Thole K.* Heat transfer and pressure loss of additively manufactured internal cooling channels with various shapes (2022) ASME Paper GT2022-82298 <https://doi.org/10.1115/1.4056775>
11. *Kirsch K.L., Thole K.A.* (2016) Heat transfer and pressure loss measurements in additively manufactured wavy microchannels, *J. Turbomach.* 139 (1) 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4034342>
12. *Ferster, K. K., Kirsch, K. L., Thole, K. A.* (2018) Effects of geometry, spacing, and number of pin fins in additively manufactured microchannel pin fin arrays. *J. Turbomach.* 140(1): 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4038179>
13. *Parbat S., Min Z., Yang L., Chyu M.* (2020) Experimental and numerical analysis of additively manufactured Inconel 718 coupons with lattice structure, *J. Turbomach.* 142 (6) (2020) 1–9. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4046527>
14. *Haasenritter A, Weigand B.* Optimization of the rib structure inside a 2-D cooling channel. 2004; ASME Paper GT2004–53187: 167-76. <https://doi.org/10.1115/GT2004-53187>
15. *Khalatov, A.A., Borisov, I.I., Severin, S.D., Romanov, V.V., Spitsyn, V.Y., Dashevskyy, Y.Y.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling. 2011: ASME Paper GT2011–41150: 1057-1065. <https://doi.org/10.1115/GT2011-45150>

THERMO-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ADDITIVELY MANUFACTURED MINI-CHANNELS

Khalatov A.A.,¹ Borisov I.I.,² Kulishov S.B.³

¹Full member of the NAS of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7696-3901, e-mail: borisov010@gmail.com

³Industrial Machinery Manufacturing «Zorya-Mashproekt», Mykolayiv, 42a Bogoyavlensky av, Ukraine, e-mail: office@zorya.com.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.3>

The aim of this work is to analyze the heat transfer, hydraulic resistance and thermo-hydraulic performance of a new type of heat exchange channels made by additive technology. The main factors affecting the quality of products and determining the heat transfer and hydraulic resistance of the channels are noted. Well-known ratios for calculating hydraulic resistance and heat transfer are not suitable for such high roughness. Data on the AT resistance coefficient of the channels show that even at low Reynolds numbers there is a contribution of roughness. With increasing roughness, the intensification of resistance and heat exchange increases. The transition occurs at $700 < Re < 2000$. Comparison of data on heat transfer augmentation and increase of hydraulic losses, as well as their thermo-hydraulic characteristics has been carried out. The hydraulic resistance coefficient of AT channels is significantly higher than the resistance coefficient of smooth channels. Heat transfer augmentation in wave-shaped channels is 2 times higher than augmentation in straight channels. Channels with pin fins allow to achieve a very high heat transfer augmentation (up to 8). Channels with internal grids provide high intensification, but have the highest hydraulic losses. The dependence of the Reynolds analogy factor on the resistance increase factor showed that the straight channels of all geometric forms fit on one dependence closed to the lower boundary line, and have a low hydraulic resistance. Data on channels with pin fins have a large spread. A number of points are above the upper boundary line, which refers to channels with low surface roughness.

Key words: additive technology, mini-channels, roughness, hydraulic resistance, heat transfer, thermo-hydraulic characteristics.

References 15, figures 13.

1. Thole, K. A., Lynch, S., Wildgoose, A. J. (2021) Review of Advances in Convective Heat Transfer Developed through Additive Manufacturing,” *Adv. Heat Transf.*, 53, p. 249-325 <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2021.06.004>

2. Kirsch, K. L., and Thole, K. A. (2017) Pressure Loss and Heat Transfer for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 108 (Pt. B), p. 2502–2513.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095>

3. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2018) Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes, *J. Turbomach.* 140 (1) 1–11. 011009. <https://doi.org/10.1115/1.4038182>

4. Wildgoose, A. J., Thole K.A., Sanders P. L., Wang L. Impact of additive manufacturing on internal cooling channels with varying diameters and build directions, *J. Turbomach.* 143 (7) (2021) 1–11. 071003. <https://doi.org/10.1115/1.4050336>

5. Parbat S.N., L. Yang L., Min, Z., M.K. Chyu M.K. (2019) Experimental and numerical analysis of additively manufactured coupons with parallel channels and inline wall jets, *J. Turbomach.* 141 (6) 1–10. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4041821>

6. Collins I.L., Weibel J.A., Pan L., Garimella S.V. Experimental characterization of a microchannel heat sink made by additive manufacturing, in: *Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 171–177. Doi:10.1109/ITHERM.2018.8419588

7. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Roughness effects on flow and heat transfer for additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) (2016) 051008. DOI:10.1115/1.4032167

8. Snyder J.C., Stimpson C.K., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Build direction effects on additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) 051006. <https://doi.org/10.1115/1.4032168>

9. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2017) Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 139 (2) 021003. <https://doi.org/10.1115/1.4034555>

10. Wildgoose A.J., Thole K. Heat transfer and pressure loss of additively manufactured internal cooling channels with various shapes (2022) ASME Paper GT2022-82298 <https://doi.org/10.1115/1.4056775>

11. *Kirsch K.L., Thole K.A.* (2016) Heat transfer and pressure loss measurements in additively manufactured wavy microchannels, *J. Turbomach.* 139 (1) 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4034342>
12. *Ferster, K. K., Kirsch, K. L., Thole, K. A.* (2018) Effects of geometry, spacing, and number of pin fins in additively manufactured microchannel pin fin arrays. *J. Turbomach.* 140(1): 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4038179>
13. *Parbat S., Min Z., Yang L., Chyu M.* (2020) Experimental and numerical analysis of additively manufactured Inconel 718 coupons with lattice structure, *J. Turbomach.* 142 (6) (2020) 1–9. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4046527>
14. *Haasenritter A, Weigand B.* Optimization of the rib structure inside a 2-D cooling channel. 2004; ASME Paper GT2004–53187: 167-76. <https://doi.org/10.1115/GT2004-53187>
15. *Khalatov, AA, Borisov, II, Severin, SD, Romanov, VV, Spitsyn, VY, Dashevskyy, YY.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling. 2011: ASME Paper GT2011–41150: 1057-1065. <https://doi.org/10.1115/GT2011-45150>

Отримано 19.02.2023

Received 19.02.2023

УДК: 662.61:621

АЕРОДИНАМІКА І СУМІШОУТВОРЕННЯ В ПАЛЬНИКАХ З БАГАТОРЯДНОЮ СТРУМЕНЕВОЮ СИСТЕМОЮ ПАЛИВОПОДАЧІ

Фіалко Н.М.¹, Прокопов В.Г.², Шеренковський Ю.В.³, Меранова Н.О.⁴, Альошко С.О.⁵¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net²докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., професор, orcid.org/0000-0002-9026-8742, e-mail: nmfialko@ukr.net³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7223-8753, e-mail: j_sher@ukr.net⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0003-1765-7319, e-mail: mnata1956@ukr.net⁵канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.4>

Наведено результати досліджень закономірностей течії та сумішоутворення палива і окиснювача у пальникових пристроях з трирядною подачею паливних струменів, орієнтованих на експлуатацію при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря. Представлено дані щодо визначення раціональних конструктивних параметрів системи паливоподачі пропонує паливників, за яких забезпечуються сприятливі умови сумішоутворення в області стабілізації полум'я.

The results of studies of the regularities of the flow and mixture formation of fuel and oxidizer in burners with a three-row supply of fuel jets, oriented to operation at various values of the excess air coefficient, are presented. Data are presented on the determination of rational design parameters of the fuel supply system of the proposed burners, under which favorable conditions for mixture formation in the flame stabilization region are provided.

Бібл. 13, рис. 5.

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

B – ширина каналу;
 B_{cm} – ширина стабілізатора;
 C_m – концентрація метану;
 d – діаметр газоподавальних отворів;
 L_z – довжина зони зворотних потоків;
 L_k – довжина каналу;
 L_{cm} – довжина стабілізатора;
 R_N – номер ряду струменевої подачі палива;

S – крок розташування газоподавальних отворів;
 Tu – інтенсивність турбулентності;
 U – швидкість;
 x, y – поздовжня і поперечна координати;
 α – коефіцієнт надлишку повітря;
 CFD – Computation Fluid Dynamic.

Вступ

З появою нових перспективних модифікацій пальникових пристроїв виникає необхідність у виконанні поглиблених досліджень їх робочих процесів. Однією з таких модифікацій є пальникові пристрої з багаторядною системою паливоподачі, орієнтовані на експлуатацію при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря.

На особливу увагу для таких пальників заслуговують дослідження аеродинаміки і сумішоутворення палива і окиснювача, оскільки вони значною мірою

визначають перебіг усіх складових робочого процесу даних пристроїв. При цьому актуальним є застосування як методів досліджень засобів математичного і комп'ютерного моделювання, що відповідає сталій світовій тенденції вивчення вказаних процесів.

Аналіз літературних джерел

Дослідженню важливих аспектів робочих процесів пальників різного типу присвячено велику кількість публікацій [1-15]. Так, в [1] на основі CFD моделювання досліджуються різні режими мікроспалювання–

зі збідненою сумішшю і безполуменевий режим за відсутності попереднього змішування метану з повітрям. В дослідженні [2] методами тривимірного комп'ютерного моделювання визначено ефекти впливу різних схем пальникових пристроїв і способу подачі паливної суміші на основні характеристики процесів переносу у топковому просторі енергетичного котла.

У ряді робіт розглядаються питання, що стосуються комп'ютерного моделювання вискоефективного мікрофакельного спалювання палива у пальникових пристроях різного типу. До прикладу, в [3-5] обговорюються особливості моделювання процесів в пальниках з ешелонованим розташуванням стабілізаторів полум'я. Статті [6, 7] присвячені дослідженню процесів переносу в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я.

Значна увага приділяється дослідженню на основі CFD моделювання робочих процесів нових модифікацій мікрофакельних стабілізаторних пальників. Так в [8 - 10] розгляду підлягали пальники з асиметричною подачею палива, орієнтовані на експлуатацію при відносно високих значеннях коефіцієнту надлишку повітря.

Виконаний аналіз літературних даних вказує на те, що для ряду нових перспективних технічних рішень мікрофакельних пальників багато питань, що стосуються їх робочих процесів, залишаються недослідженими. Зокрема, для нових пальникових пристроїв значний інтерес становлять дослідження структури течії та сумішоутворення в цих пристроях, як процесів, що значною мірою визначають ефективність спалювання палива. Важливими є дослідження, спрямовані на визначення раціональних конструктивних параметрів таких пальників. З виконаного огляду також випливає, що комп'ютерне моделювання робочих процесів пальникових пристроїв стає все більш поширеним та ефективним методом їх аналізу.

Мета і завдання досліджень

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей ізотермічної течії і сумішоутворення палива і окиснювача в мікрофакельних пальниках з трирядною системою струменевої подачі паливного газу та у визначенні раціональних конструктивних параметрів цієї системи.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

- за результатами обчислювальних експериментів встановити основні характеристики течії і сумішоутворення у пропонуваніх пальникових пристроях;

- виявити ефекти впливу різних факторів на структуру течії і сумішоутворення у досліджуваних пальниках;

- на основі даних параметричного аналізу досліджуваних процесів визначити раціональні конструктивні параметри паливоподачі пропонованих пальників, що відповідають сприятливим умовам сумішоутворення в зоні стабілізації полум'я.

Методика проведення досліджень

Об'єктом досліджень є процеси течії і сумішоутворення в пальниковому пристрої, призначеному для експлуатації в умовах різних значень коефіцієнту надлишку повітря ($1,1 \leq \alpha \leq 1,5$).

Щодо конструкції пальникових пристроїв, які розглядаються, вона базується на модульному принципі. Це дозволяє забезпечувати необхідну потужність таких пристроїв за допомогою набору певної кількості пальникових модулів. Окремий модуль включає стабілізатор полум'я із міжстабілізаторними зонами, що відносяться до нього. І оскільки процеси переносу в окремому модулі та модулі, що входить до системи модулів, є практично ідентичними, то при моделюванні доцільно обмежитися розглядом одиничного пальникового модуля. Модуль пальника складається з плоского стабілізатора полум'я 2, розташованого в каналі 1 на деякій відстані від стінок каналу (рис. 1). Підведення палива до стабілізатора полум'я здійснюється через одну із трьох, відокремлених один від одного, секцій I, II, III. Кожна із зазначених секцій відповідає подачі паливного газу за певного значення коефіцієнта надлишку повітря з вказаного діапазону. На бічних поверхнях стабілізаторів полум'я розташована трирядна система круглих отворів 3, через які газ подається безпосередньо на горіння в зносячий потік окиснювача. Така система паливоподачі, як зазначалося, покликана забезпечити можливість регулювання складу паливної суміші у зоні стабілізації полум'я. Важливим параметром, за допомогою зміни якого може бути здійснено дане регулювання, є відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d . При цьому кожному з рядів газоподавальних отворів має відповідати певне значення S/d , що задовольняє вимогам щодо складу паливної суміші в зоні стабілізації полум'я.

Дослідження проводилися на основі математичного моделювання за допомогою RANS підходу до вивчення турбулентних течій. Реалізація чисельних рішень здійснювалася із застосуванням FLUENT коду.

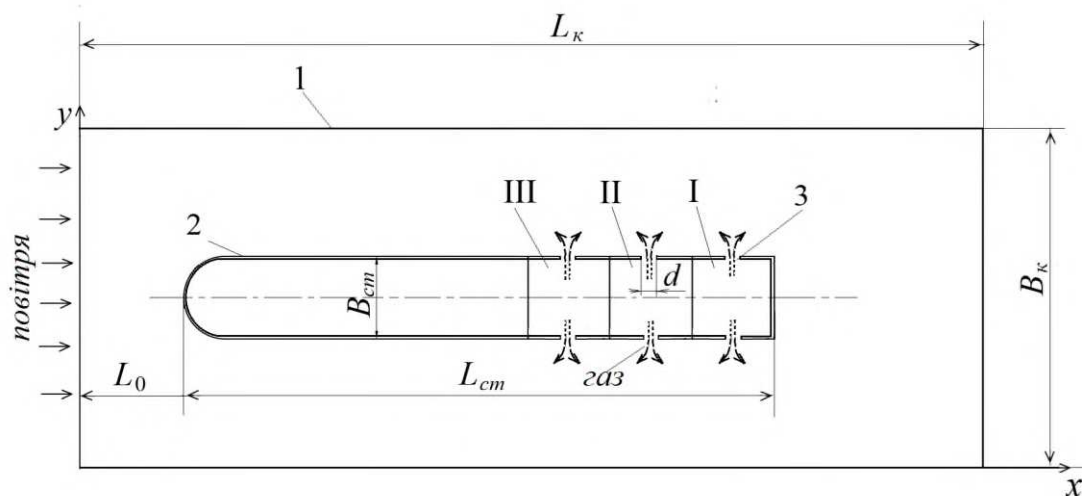


Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника стабілізаторного типу з трирядною системою подачі палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; I, II, III – секції паливоподачі з різними значеннями відносного кроку розташування газоподавальних отворів, що відповідають різним значенням коефіцієнта надлишку повітря

Математична модель досліджуваного процесу для одиничного модуля пальника може бути представлена у вигляді:

- рівняння руху

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \cdot \vec{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot (S^*), \quad (1)$$

- рівняння суцільності

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0, \quad (2)$$

- рівняння збереження маси і-го хімічного компонента

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i, \quad i=1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

- рівняння стану для багатокомпонентної суміші

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (4)$$

де $\vec{U}$ – вектор швидкості; τ – час; P – статичний тиск; S^* – тензор напружень, що враховує в'язкі напруження

та додаткові напруження, зумовлені турбулентністю; ρ – густина; Y_i – масова концентрація і-го компонента; $\vec{J}_i$ – потік маси і-го компонента, зумовлений дифузією та турбулентним переносом; M_i – молекулярна маса і-го компонента; N – кількість компонентів суміші; T – абсолютна температура; R – універсальна газова стала.

Граничні умови для наведеної вище системи рівнянь визначалися в такий спосіб. У перерізах, що відповідають входу в канал пальникового пристрою і в газоподавальні отвори, задавалися постійні значення швидкостей, концентрацій та ін. У вихідному перерізі каналу пальникового пристрою ставилися так звані «м'які» граничні умови – рівність нулю похідних всіх залежних змінних. На непроникних граничних поверхнях стабілізатора задавалися умови прилипання.

Для замикання системи рівнянь (1) – (4) у роботі виконано верифікацію моделей турбулентного переносу.

З цією метою дані експериментальних досліджень, представлені в [17], зіставлялися з розв'язками задач, отриманими із застосуванням основних моделей турбулентності, що фігурують у сучасному каталозі замикаючих моделей. А саме, k - ϵ модель у модифікаціях Standard, Realizable та RNG, моделі Спаларта-Алмареса, SST – модель Ментера (k - ω модель) та BSL – k - ω модель.

Згідно з отриманими даними, найменші відносні відхилення результатів експериментальних та розрахункових досліджень мають місце при використанні

RNG k - ϵ моделі. Для цієї моделі зазначені відносні відхилення становлять: за довжиною зони зворотних струмів у закормовій області стабілізатора – 7,2 %, за абсолютним значенням максимальної швидкості в даній зоні – 6,2 %, за числом Струхала – 6,7 % (тут число

Струхала $Sh = \frac{f \cdot B_{cm}}{U_{6x}}$, де f – частота відриву вихорів).

При моделюванні, зважаючи на геометричну симетрію пальникового модуля і симетрію фізичних процесів щодо осі міжстабілізаторних каналів, розгляду підлягала область, що відповідає половині даного модуля.

У ході досліджень обчислювальні експерименти проводилися для розрахункової області, дискретизація якої здійснювалася таким чином. Область покривалася нерівномірною неструктурованою сіткою із суттєвим згущенням біля стінок стабілізатора полум'я та містила близько мільйона комірок. Пристінковий крок задавався рівним 10^{-4} м. В області ближнього сліду за стабілізатором полум'я мінімальний крок становив $5 \cdot 10^{-4}$ м.

Результати досліджень та їх аналіз

На рис. 2-5 наведені характерні дані виконаних досліджень. Представлені результати відповідають таким вихідним параметрам: $B_{cm} = 0,03$ м; $B_{\kappa} = 0,075$ м; $L_{\kappa} = 1,3$ м; $L_0 = 0,1$ м; $L_{cm} = 0,2$ м; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Відстань L_1 між зривною кромкою стабілізатора і першим, другим і третім рядом газоподавальних отворів $L_1 = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $20 \cdot 10^{-3}$ м; $30 \cdot 10^{-3}$ м; коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу $k_f = 0,4(k_f = B_{cm}/B_{\kappa})$; швидкість повітря на вході до каналу $U_{6x}^n = 10$ м/с; інтенсивність турбулентності Tu у вхідному перерізі каналу $Tu = 3\%$. Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря.

Дослідження виконані для різних значень коефіцієнта надлишку повітря $1,1 \leq \alpha \leq 1,5$. У ході комп'ютерного моделювання варіювання α забезпечувалося шляхом зміни витрати природного газу при фіксованій витраті повітря.

Результати досліджень основних характеристик аеродинаміки і сумішоутворення в пропонованих пальникових пристроях свідчать про таке.

Течія і сумішоутворення палива та окиснювача при подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів мають загальні закономірності. На рис. 2 як приклад наведені лінії току і поля масової концентрації метану c_m для умов подачі паливного газу в перший найближчий до зривної кромки ряд газоподавальних отворів при $\alpha = 1,1$; $S/d = 5,6$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Як видно із рис. 2, а, паливні струмені розвиваються в зносячому

потоці окиснювача. У закормовій області стабілізатора полум'я утворюється вихрова структура, що відповідає за стабілізацію полум'я.

Що стосується картини сумішоутворення палива та окиснювача, то тут привертає увагу наявність зон А і В, в яких суміш знаходиться за границею концентраційних меж займання. А саме, в зонах А, розташованих над і під струменем, масова концентрація метану менша від нижньої концентраційної межі займання. У зоні В, що відповідає початковій ділянці паливного струменя, концентрація метану перевищує верхню концентраційну межу. Тобто зони А характеризуються надлишком повітря, а зона В – паливного газу.

Важливим є той факт, що в закормовій області стабілізатора полум'я, де відбувається стабілізація факела, паливна суміш знаходиться в концентраційних межах займання. Так, середня масова концентрація метану у зоні зворотних токів за стабілізатором становить у аналізованій ситуації 5,5 %.

За результатами комп'ютерного моделювання виконано аналіз залежності досліджуваних процесів у пальниках, що розглядаються, від номера ряду N_R струменевої подачі палива, відносного кроку S/d розташування газоподавальних отворів і коефіцієнта надлишку повітря α .

Що стосується зазначеного номера ряду, то отримані дані свідчать про те, що характеристики течії та сумішоутворення можуть помітно відрізнитися при подачі паливного газу через перший, другий та третій ряд газоподавальних отворів. А саме, чим більш віддалений ряд подачі палива від зривної кромки стабілізатора полум'я, тим, за інших рівних умов, нижче далекобійність паливних струменів і менша довжина зони зворотних токів L_z за стабілізатором полум'я. Як видно із рис. 3, при $\alpha = 1,1$, $S/d = 5,6$ протяжність зони зворотних токів L_z становить $96 \cdot 10^{-3}$ м, $75 \cdot 10^{-3}$ м та $70 \cdot 10^{-3}$ м відповідно при подачі палива через перший, другий і третій ряд газоподавальних отворів.

Що стосується картини сумішоутворення палива та окиснювача, то вона значною мірою визначається особливостями течії в пальниковому модулі. З віддаленням паливоподачі від зривної кромки більша частина перерізу, що проходить через торець стабілізатора, зайнята сумішшю, яка відповідає концентраційним межам займання. Щодо середньої концентрації метану $\bar{c}_m$ у зоні зворотних токів за стабілізатором, вона при цьому знижується. Згідно з отриманими даними ця концентрація для першого, другого та третього ряду паливоподачі дорівнює 4,6%, 3,4% та 2,8% при $\alpha = 1,1$; $S/d = 5,6$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м і $L_1 = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $20 \cdot 10^{-3}$ м і $30 \cdot 10^{-3}$ м.

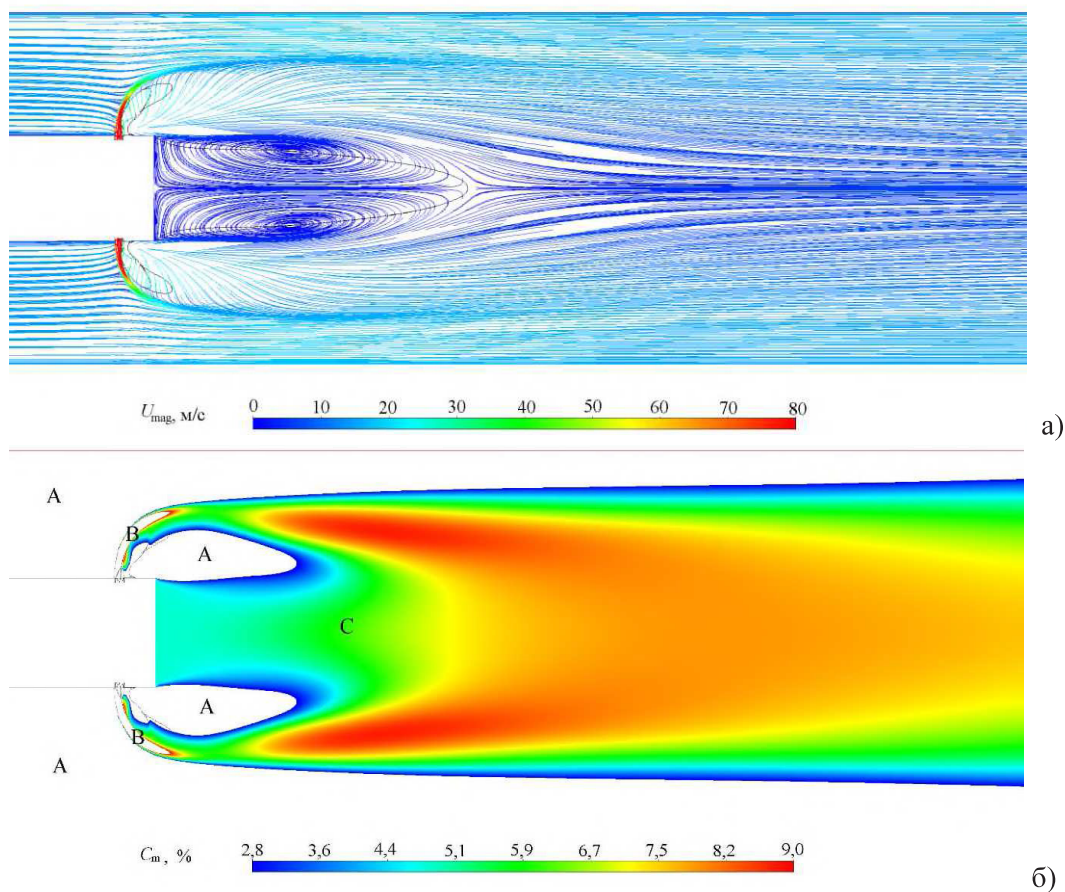


Рис. 2. Характеристики течії і сумішоутворення в поздовжньому перерізі пальникового модуля, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при $\alpha = 1,1$; $L_1 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $S/d = 5,4$; $d = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; а) лінії току; б) поле концентрацій метану

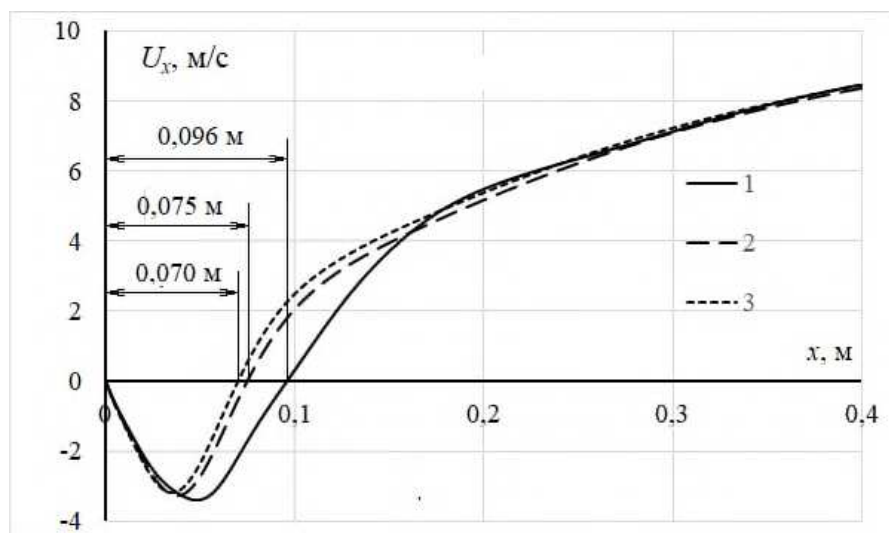


Рис. 3. Розподіл поздовжньої компоненти швидкості U_x вздовж осі сліду при $\alpha=1,1$; $S/d=5,6$; $d=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для різних рядів газоподавальних отворів: 1, 2, 3 – номер ряду, що відповідає $L_1=10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ і $30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Результати виконаних досліджень щодо виявлення ефектів впливу відносного кроку розташування S/d газоподавальних отворів на течію і сумішоутворення в палинковому модулі, який розглядається, показали таке. Зі зростанням S/d спостерігається збільшення далекобійності паливних струменів та протяжності L_z зони зворотних токів за стабілізатором полум'я. Що стосується останньої, то її збільшення є відносно невеликим в області значень S/d ($4,0 \leq S/d \leq 5,0$) і більш суттєвим при подальшому підвищенні S/d (рис. 4, а).

Згідно з отриманими даними щодо картини сумішоутворення палива і окиснювача при збільшенні кроку розташування газоподавальних отворів відбувається зменшення середньої концентрації метану $\bar{C}_m$ в зоні зворотних токів. При цьому тут, як і в залежності $L_z=L_z(S/d)$, більш різка зміна концентрації $\bar{C}_m$ спостерігається в області більших значень S/d (рис. 4, б).

Виконані дослідження показали також, що необхідна концентрація метану в зоні зворотних токів реалізується тільки при певних значеннях відносного кроку S/d . Так, для $L_i=10 \cdot 10^{-3}$ м при $S/d = 4,7$ практично вся зона зворотних токів виявляється зайнятою сумішшю з надлишком паливного газу. Зі збільшенням S/d до 5,0 у закормовій області стабілізатора у зв'язку із збільшенням далекобійності паливних струменів утворюється невелика зона, в якій суміш знаходиться в концентраційних межах займання. При подальшому збільшенні кроку розташування газоподавальних отворів до 5,2 розміри цієї зони збільшуються. Значення S/d , що дорівнює 5,4, відповідає умовам, за яких вся зона зворотних токів і область, що знаходиться за нею, зайнята сумішшю, яка перебуває в концентраційних межах займання.

В ході досліджень виконано аналіз закономірностей впливу на процеси, що розглядаються, коефіцієнта надлишку повітря для умов подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів. Отримані дані (рис. 5) свідчать, що характер впливу α виявляється в якісному відношенні однаковим для всіх рядів паливоподачі. Так, зі зростанням α спостерігається скорочення протяжності зони зворотних токів L_z та збільшення середньої масової концентрації метану $\bar{C}_m$ у цій зоні. Щодо зазначеного збільшення $\bar{C}_m$, то воно зумовлено падінням зі зростанням α далекобійності паливоподавальних струменів, що призводить до збільшення частки палива в закормовій області стабілізатора полум'я. Так, при подачі палива через перший ряд газоподавальних отворів відносна далекобійність струменів становить 0,6; 0,56 і 0,51 для $\alpha=1,1$; 1,3; 1,5.

Що стосується зазначеного підвищення величини $\bar{C}_m$ зі зростанням α , то воно виявляється тим значнішим, чим більше номер ряду паливоподачі. При збільшенні α від 1,1 до 1,5 концентрація метану $\bar{C}_m$ в зоні зворотних токів підвищується в 1,6 рази для першого ряду, в 2,2 рази для другого і в 2,4 рази для третього ряду подачі паливного газу.

Для всіх значень α , що розглядаються, як уже зазначалося, зі зростанням номера ряду N_R , (тобто з віддаленням подачі газу від зривної кромки стабілізатора полум'я), зменшується довжина зони зворотних токів L_z і середня концентрація метану $\bar{C}_m$. При цьому відносне зменшення L_z при подачі палива через перший, другий і третій ряд газоподавальних отворів є близьким за величиною для всіх значень α , що розглядаються. Щодо відповідного відносного зменшення величини $\bar{C}_m$, воно може помітно

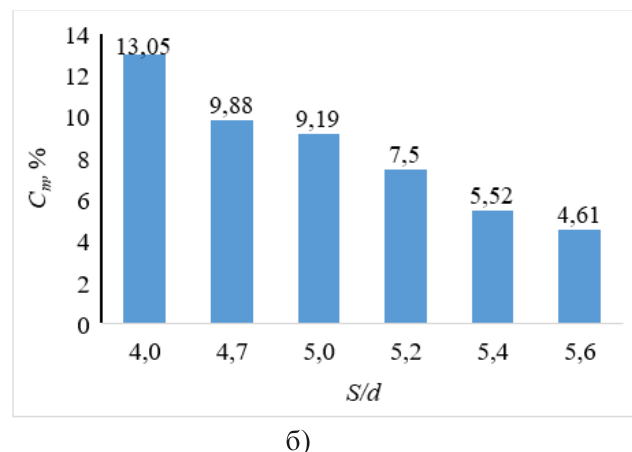
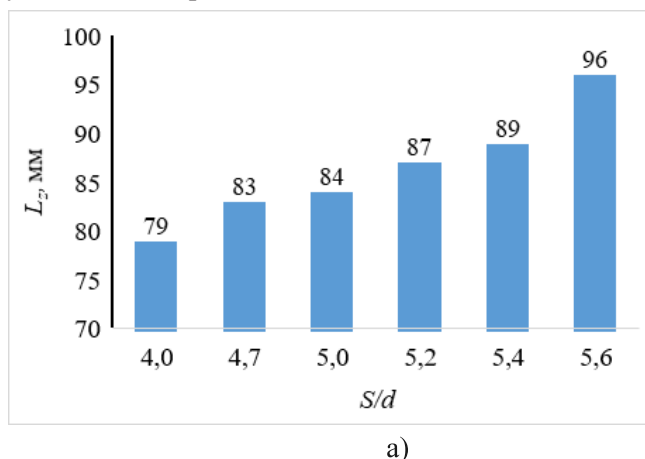


Рис. 4. Значення довжини зони зворотних токів L_z за стабілізатором полум'я (а) і середньої концентрації метану $\bar{C}_m$ в даній зоні (б) при $\alpha = 1,1$; $L_i = 10 \cdot 10^{-3}$ м і різних величинах відносного кроку S/d розташування газоподавальних отворів

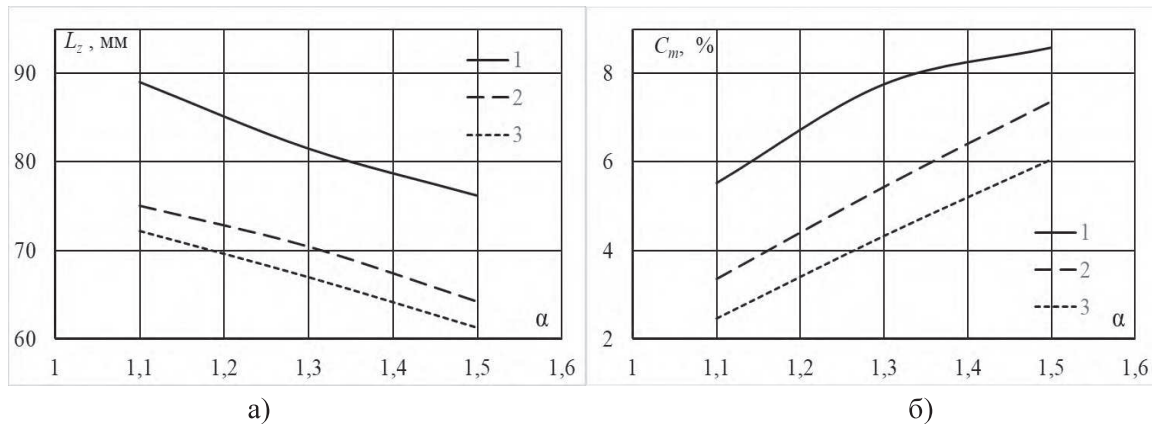


Рис. 5. Залежність довжини L_z зони зворотних токів (а) і середньої концентрації метану $\bar{C}_m$ в даній зоні (б) від коефіцієнта надлишку повітря для різних рядів N_R газоподавальних отворів: 1 – $N_R = 1$, $S/d = 5,4$; 2 – $N_R = 2$, $S/d = 5,6$; 3 – $N_R = 3$, $S/d = 5,8$

відрізнятися при різних значеннях коефіцієнтів надлишку повітря. А саме, це зменшення є найбільшим для $\alpha = 1,1$, дещо меншим при $\alpha = 1,3$ і найменшим при $\alpha = 1,5$. Так, відносне падіння концентрації метану C_m при подачі паливного газу в перший і третій ряд газоподавальних отворів становить 2,2 рази, 1,8 і 1,4 для $\alpha = 1,1$; 1,3 та 1,5.

Розв'язання задачі щодо визначення раціональних конструктивних параметрів паливоподачі пропонується конкретизувалося таким чином. Для кожної з трьох секцій паливоподачі знаходженню підлягали значення відносних кроків S/d розташування газоподавальних отворів, що відповідають таким умовам. При подачі палива через одну з секцій - першу, другу або третю, пальниковий пристрій повинен експлуатуватися відповідно при $\alpha = 1,1$; 1,3 та 1,5. При цьому, як уже зазначалося, повинні забезпечуватися сприятливі умови сумішоутворення в закормовій області стабілізатора полум'я. В якості таких сприятливих умов прийнято забезпечення в зоні зворотних токів за стабілізатором середньої величини концентрації метану $\bar{C}_m$, що дорівнює із заданою точністю середньому значенню між верхньою і нижньою концентраційними межами займання $C_m^e = 5,9\%$.

З отриманих даних слідує, що рекомендований відносний крок розташування газоподавальних отворів збільшується від першого $N_R = 1$ до третього $N_R = 3$ ряду паливоподачі і становить 5,4; 5,6 та 5,8 відповідно для першого, другого та третього ряду. Що стосується діаметра газоподавальних отворів d для різних секцій подачі паливного газу, то при фіксованій величині відстані між отворами $S = 14 \cdot 10^{-3}$ м рекомендовані

значення цих діаметрів становлять для першого ряду $2,6 \cdot 10^{-3}$ м, для другого $2,5 \cdot 10^{-3}$ м і $2,4 \cdot 10^{-3}$ м для третього ряду.

Висновки

1. Отримано дані CFD моделювання процесів течії та сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з трирядною системою струменевої подачі паливного газу при значеннях коефіцієнта надлишку повітря $1,1 \leq \alpha \leq 1,5$. Встановлено основні закономірності перебігу зазначених процесів у пальниках даного типу. Особливу увагу приділено розгляду характеристик течії та сумішоутворення у закормовій області стабілізатора полум'я, де формуються вихрові структури, відповідальні за стабілізацію факелу.

2. Виявлено закономірності впливу на аеродинаміку та сумішоутворення палива та окиснювача в пальниках, що розглядаються, таких факторів, як номер ряду струменевої подачі палива, відносний крок розташування газоподавальних отворів і коефіцієнт надлишку повітря. Показано, що характеристики течії і сумішоутворення помітно відрізняються при подачі палива в різні ряди паливоподавальних отворів і суттєво змінюються при варіюванні відносного кроку їх розташування. Встановлено також, що характер впливу коефіцієнта надлишку повітря є якісно однаковим при подачі паливного газу в різні секції паливоподачі.

3. Визначено раціональні конструктивні параметри системи паливоподачі пальникових пристроїв, що розглядаються. Для кожної з трьох секцій паливоподачі встановлено значення відносних кроків газоподавальних отворів, при яких забезпечуються сприятливі умови сумішоутворення в закормовій області стабілізатора полум'я.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Seyed Ehsan, Hosseini Mazlan, Abdul Wahid.* (2014) Investigation of bluff-body micro-flameless combustion. *Energy Conversion and Management*. Volume 88. P. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.023>
2. *Askarova, A. S., Messerle, V. E., Bolegenova, S. A., Maksimov, V. Yu., Bolegenova S. A. & Nugymanova, A. O.* (2022). Influence of the method of air-fuel mixture supply on the main characteristics of heat and mass transfer processes. *Thermophysics and Aeromechanics*. Volume 29. Pages 107–124 <https://doi.org/10.1134/S0869864322010097>
3. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовський Л.С., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Полозенко Н.П.* Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. *Промышленная теплотехника*. 2011. №2. С. 59-64.
4. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовський Л.С., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Коханенко П.С., Полозенко Н.П.* Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени. *Промышленная теплотехника*. 2010 №6. С. 28-36.
5. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Алешко С.А., Иваненко Г.В., Юрчук В.Л., Милко Е.И., Ольховская Н.Н.* Моделирование структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов при варьировании шага их смещения. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. т. 2, №8(74). С.29-34. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39193, <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/39193/37251>
6. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.* Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. *Научный вестник НЛТУ Украины*. 2014. Вип. 24.5 С. 136-142. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/24.pdf](https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/24.pdf)
7. *Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.* Математическое моделирование процессов течения и смешения в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. т.3, №8(69). С.40-44.
8. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулин М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Реграги А., Евтушенко А.А.* Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей топлива. *Научный вестник НЛТУ Украины*, 2018, т.28, № 8. С 117-121. <https://doi.org/10.15421/40280823>, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2018/28_8/25.pdf](https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2018/28_8/25.pdf)
9. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Рокитько К.В.* CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. т. 41. №4. С.13-18.
10. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I., Evtushenko A.A.* Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. *Технологические системы*. 2018, 3(38). С. 37-43.
11. *Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Полозенко Н.П.* Компьютерное моделирование процесса смешения в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносный поток воздуха. *Промышленная теплотехника*. 2011. №1.-С. 51-56.
12. *Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Прокопов В.Г., Грановская Е.А., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Коханенко П.С.* Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком. *Пром теплотехника*. 2010. №5. С. 26-33.
13. *Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Бутовський Л.С.* Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. *Технологические системы*. 2012. № 1. С.52-57. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/309/316>
14. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V.* Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192.

15. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С., Тимощенко О.Б. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» / Институт промышленной экологии. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.

16. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Миргородський А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа. Промышленная теплотехника. 2012. т. 34, №1. С. 64-71.

17. Jones, W.P., Marquis, A.J., Wang, F. Large eddy simulation of a premixed propane turbulent bluff body flame using the Eulerian stochastic field method. Fuel. 2015. V. 140. P. 514-525. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.050>

AERODYNAMICS AND MIXTURE FORMATION IN BURNERS WITH A MULTI-ROW JET FUEL SUPPLY SYSTEM

Fialko N.M.¹, Prokopov V.², Sherenkovskiy Ju.³,
Meranova N.⁴, Aleshko S.⁵

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Professor, orcid.org/0000-0002-9026-8742, e-mail: nmfialko@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7223-8753, e-mail: j_sher@ukr.net

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0003-1765-7319, e-mail: mnata1956@ukr.net

⁵PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.4>

The purpose of the work is to establish the laws of isothermal flow and mixture formation of fuel and oxidizer in a new modification of microjet burners equipped with a three-row fuel jet system and oriented to operation at various values of the excess air coefficient. The proposed burners are designed to provide the ability to control the composition of the fuel mixture in the flame stabilization zone and, in general, high efficiency of fuel combustion under the conditions under consideration. As part of the work, the following tasks were to be solved: to establish the main characteristics of the flow and mixture formation in the these burners; to identify the effects of various factors on the structure of the flow and mixture formation in these burners; to determine the rational design parameters of the

fuel gas supply system, which realize favorable conditions for the mixture formation of fuel and oxidizer in the flame stabilization zone of the proposed burners. Computer simulation using Fluent code was used as a research method.

The main features of aerodynamics and mixture formation of fuel and oxidizer in the considered burner devices are revealed. The dependences of the characteristics of the processes under study on a number of design and operating parameters have been established. In particular, a comparative analysis of the patterns of flow and mixture formation during the operation of burner devices was performed for various values of the excess air coefficient corresponding to the supply of fuel gas to various fuel supply sections. Data have been obtained to determine the values of the geometric parameters of the fuel supply system, under which the necessary conditions for mixture formation in the flame stabilization zone are realized.

References 17, figures 5.

Key words: CFD modeling, microjet burners, mixture formation of fuel and oxidizer, aerodynamics.

1. Seyed Ehsan, Hosseini Mazlan, Abdul Wahid. Investigation of bluff-body micro-flameless combustion. Energy Conversion and Management. 2014. V. 88. P. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.023>

2. Askarova A.S., Messerle V.E., Bolegenova S.A., Maksimov V.Yu. & Nugymanova A.O. Influence of the method of air-fuel mixture supply on the main characteristics of heat and mass transfer processes. Thermophysics and Aeromechanics. 2022. V. 29. P. 107-124 <https://doi.org/10.1134/S0869864322010097>

3. Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovsky L.S., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.O., Meranova N.O., Polozenko N.P. Peculiarities of the flow of fuel and oxidizer with an echeloned arrangement of flame stabilizers. Industrial heat engineering. 2011. No. 2. P. 59-64. (in rus.)

4. Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovsky L.S., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.O., Kokhanenko P.S., Polozenko N.P. Modeling of the flow structure of an isothermal stream in an echeloned lattice of flat flame stabilizers. Industrial heat engineering. 2010. No. 6. P. 28-36. (in rus.)

5. Fialko N.M., Sherenkovskii Ju.V., Prokopov V.G., Polozenko N.P., Meranova N.O., Aleshko S.A., Ivanenko G.V., Yurchuk V.L., Milko E.I., Olkhovskaya N.N. Modeling of the flow structure in echeloned grids of stabilizers by varying their displacement step. 2015. V.2. №8(74). P.29-34. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39193, <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/39193/37251>(in rus.)

6. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Maison N.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klishch A.V., Strizheus S.N., Timoshchenko A.B.* Intensification of transfer processes in a burner with a cylindrical flame stabilizer. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2014. 24.5 P. 136-142. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/ https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/24.pdf](https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/24.pdf) (in rus.)
7. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Maison N.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klishch A.V., Strizheus S. N., Timoshchenko A.B.* Mathematical modeling of flow and mixture formation processes in a cylindrical stabilizer burner. Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2014. V.3. No. 8(69). P.40-44. (in rus.)
8. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Abdulin M.Z., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Olkhovskaya N.N., Regragi A., Evtushenko A.A.* Computer simulation of flow in microjet burners with asymmetric fuel supply. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2018. V.28. № 8. P. 117-121. <https://doi.org/10.15421/40280823> (in rus.)
9. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Alyoshko S.O., Meranova N.O., Rokitko K.V.* CFD modeling of the temperature regimes of the combustion zone of stabilizer type burners with asymmetric fuel supply. Thermophysics and thermal power engineering. 2019. V. 41. №4. P.13-18. (in Ukr.)
10. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I., Evtushenko A.A.* Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. Технологические системы. 2018. 3(38). С. 37-43.
11. *Fialko N.M., Butovsky L.S., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P.* Computer simulation of the mixture formation process in stabilizer-type burners with gas supply introduced into the blowing air flow. Industrial heat engineering. 2011. No.1. P. 51-56. (in rus.)
12. *Fialko N.M., Butovsky L.S., Prokopov V.G., Granovskaya E.A., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.A., Kokhanenko P.S.* Features of the flow around flat stabilizers with a limited flow Prom heat engineering. 2010. No. 5. P. 26-33. (in rus.)
13. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.O., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Butovsky L.S.* Efficiency of cooling systems for burners of jet-stabilizer type. Technological systems. 2012. № 1. P.52-57.
<http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/309/316> (in rus.)
14. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju. V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V.* Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192.
15. *Fialko N.M., Sherenkovskii Yu.V., Maison M.V., Abdulin. M.Z., Khomuk S.V., Enina A.A., Novitsky V.S., Timoshchenko A.B.* Increasing the intensity of transfer processes in a cylindrical stabilizer burner by using rectangular annular niches. Collection of works "Problems of ecology and operation of power facilities" / Institute of industrial ecology. K.: IPTs ALKON NAS of Ukraine, 2014. P. 122-125. (in Ukr.)
16. *Fialko N. M., Prokopov V. G., Sherenkovskii Ju. V., Aleshko S. A., Meranova N. O., Abdulin M. Z., Butovskii L.S., Mirgorodsky A. N.* Computer modeling of transfer processes in cooling systems of stabilizer-type burners. Industrial heat engineering. 2012. V. 34. №1. P. 64-71. (in rus.)
17. *Jones, W.P., Marquis, A.J., Wang, F.* Large eddy simulation of a premixed propane turbulent bluff body flame using the Eulerian stochastic field method. Fuel. 2015. V. 140. P. 514-525. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.050>

Отримано 05.04.2023

Received 05.04.2023

УДК 664.8.047:536.66

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ВИТРАТИПетрова Ж.О.¹, д.т.н., Слободянюк К.С.², к.т.н., Іванов С.О.³, к.т.н., Граков О.П.⁴¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, головний науковий співробітник, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, ironket@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3416-388X>³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, teplomer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2722-7323>⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, аспірант, grakovcom@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0743-2431><https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.5>

Представлено комплексні дослідження по визначенню впливу комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів (ягід лохини, *Vaccinium corymbosum* L.) на енергетичні витрати. Досліджено вплив попередньо розроблених гігротермічної та обробки інфрачервоним випромінюванням свіжої лохини на кінетику та зміну швидкості сушіння ягід. Застосування інфрачервоного випромінювання дозволило скоротити загальну тривалість процесу зневоднення в 1,2 рази. Експериментальне визначення теплоємності та теплоти випаровування вологи з попередньо оброблених ягід лохини показало надлишкові витрати енергії на можливий фазовий перехід воскової оболонки ягоди при сушінні та зменшення ефективності сушіння матеріалу при значеннях вологості $W^c \leq 20\%$.

Comprehensive studies are presented to determine the impact of combined drying of colloidal capillary-porous materials (blueberry, *Vaccinium corymbosum* L.) on energy consumption. The effect of pre-developed hygrothermal and infrared treatment of fresh blueberries on the kinetics and change in the drying speed of berries was studied. The use of infrared radiation made it possible to reduce the total duration of the dehydration process by 1.2 times. Experimental determination of heat capacity and heat of evaporation of moisture from pre-processed blueberry showed excess energy consumption for a possible phase transition of the waxy shell of the berry during drying and a decrease in the drying efficiency of the material at moisture values $W^c \leq 20\%$.

Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: лохина, сушіння, віск, гігротермічна обробка, інфрачервоне випромінювання, теплота випаровування, питома теплоємність.

Постановка проблеми. Сушильні процеси є одними з найбільш енергоємних технологічних процесів і, враховуючи високу вартість енергоресурсів, в значній мірі впливають на економічні показники виробництва [1]. В класичному розумінні, сушіння — процес видалення вологи з матеріалу, за якого змінюються структурно-механічні, технологічні та біологічні властивості, викликані зміною форми зв'язку вологи [2]. Відомо, що після зневоднення капілярно-пористі тіла стають крихкими, мало стискаються і легко піддаються переробці в порошкоподібний стан; колоїдні тіла за зміни вмісту вологи значно змінюють свої розміри, але зберігають пластичні або пружні властивості; колоїдні капілярно-пористі тіла мають капілярно-пористу будову, а стінки капілярів – властивості обмежені набуханням колоїдних тіл (ягоди, фрукти, овочі, шкіра, тканини, деревина) [2].

З кожним роком валове виробництво та урожайність ягідних культур в Україні зростає [3]. На сьогоднішній день ягоди лохини вирощуються в усіх регіонах України, де дозволяють природні умови. Загальною площею насадження 2 тис. га і з кожним роком ця площа збільшується. При високій врожайності свіжі ягоди не встигають реалізувати, тому залишки доцільно переробляти за допомогою сушіння до низької кінцевої інтегральної вологості матеріалу 4-8 % з метою отримання натурального ягідного порошку. Останній в подальшому може бути використаний в харчовій, кондитерській та фармацевтичній промисловості.

Ягоди лохини мають короткий термін зберігання. Ця проблема в переважній більшості вирішується тим, що лохину заморожують і в такому стані більш активно відбувається експорт замороженої ягідної продукції

до країн Євросоюзу [4]. Недоліком цього є необхідність в додатковому обладнанні під час транспортування та зберігання.

Усі всесвітньовідомі способи сушіння ягід супроводжуються такими проблемами, як: висока тривалість сушіння, неможливість використання високих температур повітря через ймовірність перегріву та пригорання ягід, втрати вітамінів та біологічно активних речовин, утворення плівки на шкірці з подальшим ускладненням волого-видалення [5].

Таким чином виникає необхідність у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень сушіння ягідної сировини з метою вибору найраціональнішого способу підведення енергії та процесу в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що існуючі дослідження, що іноземними

дослідниками у більшості випадків надається перевага більш енергоємним методам сушіння: вакуумному, сублімаційному та їх комбінуванню між собою або з класичним конвективним сушінням.

Відоме дослідження [6] загальної тривалості зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння та питомого енергоспоживання стосувалося: сушіння нагрітим повітрям, під вакуумом, інфрачервоне сушіння, сублімація, а також комбінування цих методів (принцип поєднання детально представлено в таблиці 1).

Авторами [7] проводилися дослідження загальної тривалості висихання для кожного вищезазначеного методу показали, що сублімація (тривалість 22 год) має найдовшу тривалість зневоднення лохини. Найкращі результати тривалості сушіння показали інфрачервоне, конвективне та вакуумне сушіння 75, 420 та 480 хви-

Таблиця 1. Опис комбінування методів сушіння [6]

N п/п	Назва	Перша стадія сушіння	Друга стадія сушіння
1	Сушіння конвективне2-сублімація (загальна тривалість – 1050 хв)	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 2 годин до вологовмісту матеріалу 54,5%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,6%.
2	Сушіння конвективне3-сублімація (загальна тривалість – 960 хв)	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 3 годин до вологовмісту матеріалу 40,3%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,4%
3	Сушіння конвективне4-сублімація (загальна тривалість – 900 хв)	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 4 годин до вологовмісту матеріалу 33,7%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,9%
4	Інфрачервоне сушіння5-сублімація (загальна тривалість – 785 хв)	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 5 хвилин до вологовмісту матеріалу 46,9%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,1%
5	Інфрачервоне сушіння10-сублімація (загальна тривалість – 670 хв)	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 10 хвилин до вологовмісту матеріалу 35,4%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,2%
6	Інфрачервоне сушіння15-сублімація (загальна тривалість – 615 хв)	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 15 хвилин до вологовмісту матеріалу 26,5%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,6%
7	Вакумне сушіння2- сублімація (загальна тривалість – 1140 хв)	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 2 годин до вологовмісту матеріалу 59,2%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 3%
8	Вакумне сушіння3- сублімація (загальна тривалість – 960 хв)	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 3 годин до вологовмісту матеріалу 44,4%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,7%
9	Вакумне сушіння4- сублімація (загальна тривалість – 900 хв)	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 4 годин до вологовмісту матеріалу 36,2%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,8%

лин відповідно. Час висихання комбінованим методом інфрачервоне сушіння – сублімація (785, 670 і 615 хв) було самим короткотривалим серед комбінованих методів сушіння [7].

Окрім того, з дослідження [6] встановлено, що 5-годинне попереднє сушіння під вакуумом, сушіння нагрітим повітрям і 20-хвилинне попереднє сушіння інфрачервоним випромінюванням викликають помітне потемніння (так звана реакція Майяра) на поверхні зразків.

Вплив одно- і двоступінчатих методів сушіння на питоме споживання енергії (МДж/кг води) представлено на рис. 1.

Зі скороченням тривалості сушіння загальне питоме споживання енергії зменшується. У експерименті із застосуванням комбінованого сушіння енергоспоживання значно знижується зі збільшенням часу попереднього сушіння (з 2 до 4 год і з 5 до 15 хв). Найвищий рівень показника питомого енергоспоживання був зареєстрований в сушіння сублімацією (495,1 МДж/кг води) в порівнянні з іншими методами сушіння [8]. При сублімаційному сушінні базова енергія, необхідна для видалення 1 кг води, майже в сім разів вища, ніж при звичайному конвективному сушінні [6]

Таким чином найраціональнішими методами сушіння ягід лохини залишаються: інфрачервоне, конвективне та вакуумне. Але сушіння інфрачервоним

випромінюванням викликає погіршення якісних характеристик матеріалу, а зневоднення у вакуумі відоме високими витратами енергії. Тому можна припустити, що останні два методи краще використовувати в комбінації з іншими.

В статті дослідниками [5] виконувались дослідження кінетики сушіння чорниці, чорної та червоної смородини при різних способах підведення енергії. Сушіння до досягнення значень рівноважної вологості ягід відбувалося за допомогою: конвективно з природньою циркуляцією сушильного агенту; конвективно з вимушеною циркуляцією сушильного агенту; конвективно з попереднім прокалюванням та вимушеною циркуляцією сушильного агенту; конвективно з інфрачервоним випромінюванням. Результати досліджень [5] показали, що конвективне сушіння з інфрачервоним випромінюванням дозволило зменшити загальну тривалість процесу на 25-42 % і підвищити швидкість зневоднення на 19-38%. Проте дослідниками не повідомлялось яким був тепловий потік інфрачервоного джерела. Також не висвітлено дані по зміні температури всередині ягід протягом всього процесу. Відсутнє обґрунтування вибору температури 70 °С для сушильного агенту.

Раніше виконаний нами теоретичний аналіз показав [9], що більшість існуючих досліджень присвячені енерговитратним методам сушіння, які були реалізовані

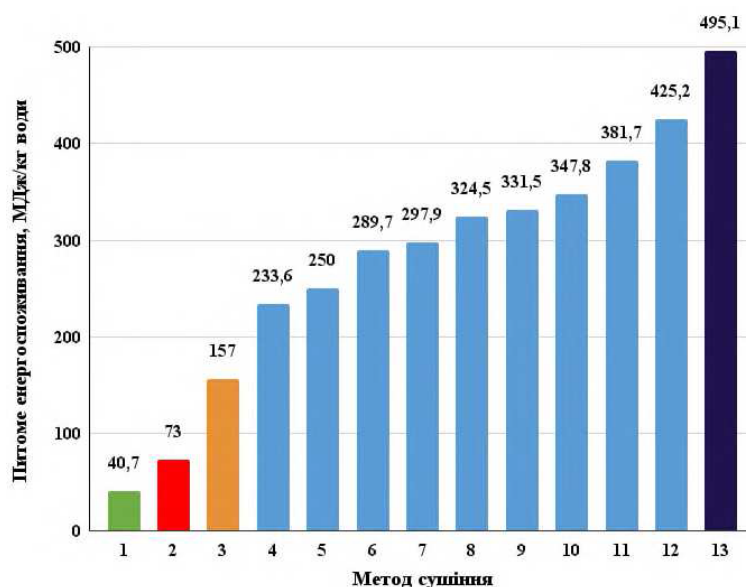


Рис. 1. Питоме енергоспоживання зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння:
 1 – інфрачервоне, 2 – конвективне, 3 – вакуумне, 4 – інфрачервоне15-сублімаційне, 5 – інфрачервоне10-сублімаційне, 6 – конвективне4-сублімаційне, 7 – інфрачервоне5-сублімаційне, 8 – конвективне3-сублімаційне, 9 – вакуумне4-сублімаційне, 10 – вакуумне3-сублімаційне, 11 – конвективне2-сублімаційне, 12 – вакуумне2-сублімаційне, 13 – сублімаційне

в лабораторних умовах, а також є складними для промислового масштабування. Отже, постає питання розробити ефективну підготовку та енергоефективну теплотехнологію сушіння ягід лохини доступними до реалізації в промислових умовах.

Метою роботи є визначити вплив комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів (ягід лохини) на енергетичні витрати.

Методи дослідження включають вивчення та аналіз літературних даних існуючих досліджень тепломасообміну під час сушіння ягід лохини відомими методами. Експериментальні дослідження кінетики сушіння ягід лохини проводилися на експериментальному конвективному стенді із вимушеною рециркуляцією теплоносія та інфрачервоними випромінювачами, який розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України у відділі тепломасопереносу в теплотехнологіях. Програмою досліджень передбачено виявлення основних закономірностей сушіння рослинної сировини в широкому діапазоні зміни факторів з проведенням автоматичного збору та обробки інформації про зміну маси, температури зразка з кроком по часу 15 секунд та розрахунків кінетики. Конструкція стенду має: систему ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильні камери (в тому числі з ІЧ-лампами), системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичний збір і обробку інформації про кінетику процесу сушіння матеріалу [10]. Дослідження проводилися в 3 повтореннях.

Теплоту випаровування води зі зразків та їх теплоємність було досліджено за допомогою створеної в Інституті технічної теплофізики НАН України установки синхронного термічного аналізу ДМКИ-01 [11].

В основі методу визначення теплоти випаровування з використанням даної установки лежить припущення

про те, що в ізотермічних умовах теплота, яку підведено до вологого матеріалу, витрачається на випаровування з нього рідини. В установці, яка обладнана двома ідентичними комірками з циліндричними сенсорами теплового потоку, передбачено задавання та підтримання ізотермічного температурного поля, в якому розміщено досліджуваний зразок (рис.2).

Теплота до зразка підводиться кондуктивно, та реєструється сенсорами теплового потоку. Одночасно з цим визначається кількість рідини, яка випарувалась з поверхні матеріалу шляхом реєстрації зміни маси зразка за час проведення досліду. Інтенсифікація процесу сушіння в установці забезпечується постійним видаленням повітря з надлишковою вологою з робочої камери. Теплота випаровування визначається як відношення кількості теплоти, яка підведена до зразка за певний проміжок часу до втрати маси зразком за цей час:

$$\bar{q}_{ij}(T, m, \tau) = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_j} [Q_1(T) - Q_2(T) + Q_{HT}(T)] d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_j)} \quad (1)$$

де: $\bar{q}_{ij}(T, m, \tau)$ – питома теплота випаровування за інтервал часу від початкового моменту i до кінцевого моменту j ; $Q_1(T)$ – тепловий потік через комірку 1; $Q_2(T)$ – тепловий потік через комірку 2; $Q_{HT}(T)$ – неконтрольований тепловий потік; $m(\tau_i) - m(\tau_j)$ – втрата маси зразком за час від τ_i до τ_j

Визначення питомої теплоємності здійснювали за стандартизованим методом покрокового сканування [12] в діапазоні температур від 30 до 95°C. Відповідно до методу, після розміщення зразка відомої маси в робочій комірці та її подальшої герметизації, реалізується покроковий режим підвищення температури. Він полягає

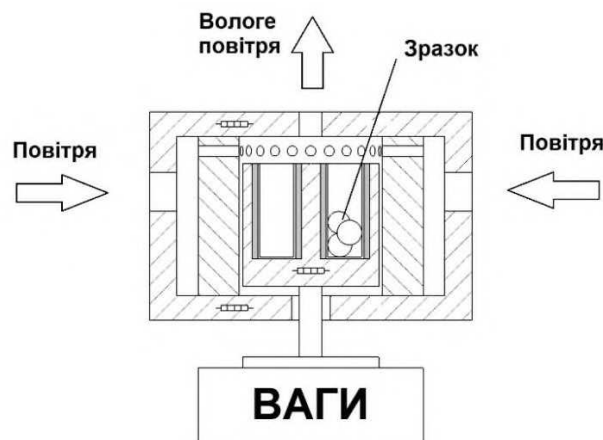


Рис. 2. Принципова схема теплового блоку установки ДМКИ-01

у почерговому підвищенні температури робочої камери теплового блоку на 5 °С та витримуванні зразка в стаціонарних умовах за заданої температури. При цьому реєструється кількість теплоти, що витрачається на нагрівання досліджуваного зразка. Тривалість кожного інтервалу між послідовними підвищеннями температури зразка обумовлена часом встановлення в комірці ізотермічного середовища і для зразків лохини становила 25 хв. Теплоємність матеріалу в заданому інтервалі визначалася як відношення кількості теплоти, яку витрачено на нагрівання зразка до різниці значень початкової та кінцевої температури інтервалу:

$$c = 1/m \cdot \left[\int_{\tau_1}^{\tau_2} \Delta Q(\tau) d\tau / \Delta T + \Delta C_{БАЛ} \right], \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (2)$$

де: m – маса досліджуваного зразка; ΔQ – різниця теплових потоків, що реєструються робочою коміркою та коміркою-референтом за час від τ_1 до τ_2 (тривалість інтервалу); ΔT – різниця значень температури між інтервалами; $\Delta C_{БАЛ}$ – параметр, який враховує неідентичність теплофізичних властивостей робочої комірки і комірки-референта;

Викладення основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Доведено, що споживання лохини (*Vaccinium corymbosum* L.) в раціон харчування дозволяє покращити стан здоров'я людини [6]. Ягода має високий вміст антиоксидантних з'єднань (флавоноїдів і антоціанів) і вітамінів А, В, С і Е, добре відома своїми протипухлинними, протизапальними та протидіабетичними властивостями [6].

Антоціани — це природні пігменти в ягодах, саме червоного, синього і фіолетового кольорів, які широко використовуються як барвники в багатьох продуктах харчування [13].

Відомо, що вміст антоціанів в ягодах значно різниться, наприклад (в г/кг свіжої маси) їх вміст у: лохини — 0,37; ожини — 0,25; журавлини — 0,14; винограду — 0,03; малини — 0,09; полуниці — 0,02 [14]. Отже, найвищий вміст антоціанів у ягодах лохини, але під час переробки вони легко руйнуються [14].

Розмір та маса ягоди, вміст кісточок, наявність шкірки та її властивості – технологічні властивості сировини, які є надважливими характеристиками для сушіння ягід. Ягода лохини складається з шкірки з восковим нальотом та м'якоті.

Всі ці фактори обов'язково мають бути враховані при дослідженні сушіння ягід лохини різними методами, оскільки деякі з них можуть суттєво вплинути на загальну тривалість зневоднення та тепломасообмінного

процесу в цілому. Іншими словами можна сказати, що хімічні властивості та структура ягідних культур потребують ретельного вивчення і відповідно до цього матеріал має правильно зневоднюватись.

Ягоди, як і вся рослинна сировина, – термолабільний колоїдний капілярно-пористий матеріал, що при обробці сушінням потребує «м'яких» температурних впливів теплоносія. Нами виконано порівняльний аналіз впливу гіротермічної обробки ягід на тривалість зневоднення і інфрачервоного (ІЧ) випромінювання тепловим потоком 3800 Вт/м² протягом 10 хв з одночасним сушінням при режимних параметрах теплоносія (повітря) $t=60$ °С, $v=3$ м/с, $d=10$ г/кг с. п. Початкова маса шару ягід становила 65 г з початковою вологістю $W_n = 85$ %. Отримані графіки кінетики сушіння ягід лохини мають вигляд характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Сушіння зразків виконувалося до досягнення ними середньої (інтегральної) вологості $W_s = 12,65$ %. Застосування ІЧ-випромінювання дозволило скоротити загальну тривалість процесу зневоднення в 1,2 рази (рис. 3, а) [10].

Після проведеного регресійного аналізу графіків залежності $W^c=f(\tau)$ виконувалося диференціювання в програмному забезпеченні Advanced Grapher. Отримано графіки залежності швидкості сушіння $dW/d\tau$, %/хв від середньої вологості матеріалу W^c , % (рис. 3, б).

По мірі заглиблення зони випаровування, при зменшенні середньої вологості матеріалу зростає швидкість сушіння ягід. Найбільшої швидкості сушіння матеріал набуває при зменшенні

$W^c = 50...18$ %. Під час дослідження кінетики сушіння ягід нами були отримані дані зміни температури лохини. Можна припустити, що через зростання внутрішньої температури ягід ≥ 55 °С і внутрішнього тиску відбувається помірне руйнування частини оболонки клітин. Це може дати можливість інтенсивнішому виділенню вологи з матеріалу під час сушіння. Як видно з рис.3, б ягоди лохини оброблені інфрачервоними випромінювачами потужністю 100 Вт ($\tau_n=10$ хв) на початку сушіння з подальшим досушуванням при температурі теплоносія 60 °С характеризуються вищою швидкістю сушіння (крива 2) відносно конвективного сушіння при температурі теплоносія 60 °С попередньо гіротермічно оброблених ягід лохини (крива 1).

На рис. 4 показана залежність питомої приведенної теплоти випаровування вологи з тканин цілих попередньо оброблених ягід лохини від їх відносної вологості для температури сушіння 60 °С і 80 °С. Експериментально показано, що вже на ранніх етапах сушіння спостерігається перевищення виміряних значень тепло-

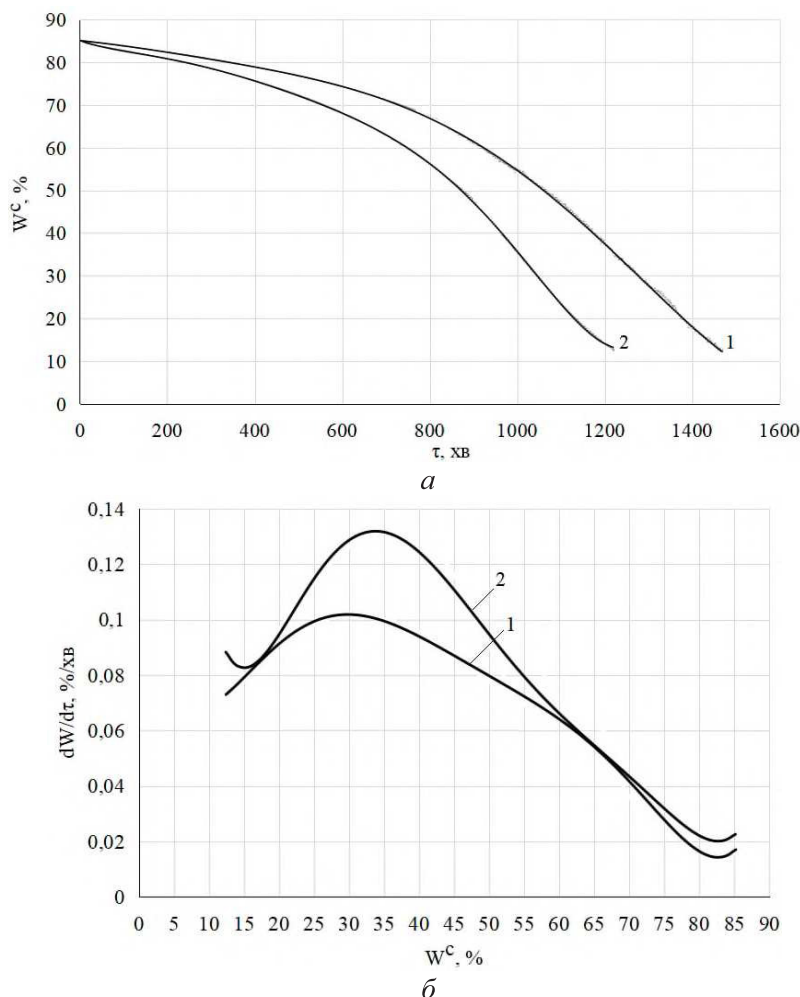


Рис. 3. Кінетика сушіння (а) та зміна швидкості (б) зневоднення ягід лохини в залежності від типу обробки.

Режимні параметри теплоносія: $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 3\text{ м/с}$, $d = 10\text{ г/кг с.п. 1 шар}$.

- 1 – попередньо гігротермічно оброблені ягоди лохини (загальна тривалість зневоднення $\tau = 1468,15\text{ хв}$);**
2 – ягоди лохини оброблені інфрачервоними випромінювачами потужністю 100 Вт ($\tau_{\text{п}} = 10\text{ хв}$) на початку сушіння (загальна тривалість зневоднення $\tau = 1219,35\text{ хв}$)

ти випаровування рідини над рекомендованими значеннями для чистої води з тенденцією до зростання.

Можна припустити, що це пов'язано із впливом на вимірювану величину розчинених у волозі ягоди органічних сполук, в основному цукрів. Підвищення питомої теплоти випаровування зі зменшення вологості зразка вказує на переважаючий вклад витрати енергії у вивільнення зв'язаної з матеріалом вологи та поступове збільшення концентрації органічних розчинів. Лавиноподібне підвищення теплоти випаровування наприкінці сушіння ($W^c \leq 20\%$) показує, що більшість енергії, яку підводять до зразка, витрачається на видалення абсорбційно-зв'язаної вологи.

Питома теплоємність лохини, як показано на рис. 5 в основному залежить від вмісту в ній рідини, що типово для вологих капілярно-пористих матеріалів. Проте, для низьких значень вологості, (27%, 13% та 4%) спостерігаються аномалії у вигляді пікового підвищення ефективної теплоємності для температури $55\ldots 60^{\circ}\text{C}$. Автори [15] припускали, що таке підвищення теплоємності пов'язане з фазовим переходом захисної воскової плівки, яка запобігає висиханню ягоди в природному середовищі.

Попередньо нами досліджувався вплив ІЧ обробки на кількість воскового нальоту на ягодах лохини. Було встановлено, що ІЧ обробка стимулює процес руйнування воскового нальоту в подальшому під час сушіння.

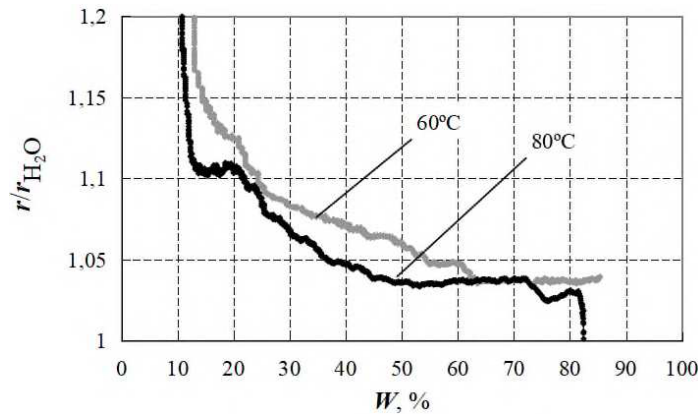


Рис. 4. Залежність питомої теплоти випаровування води з оброблених інфрачервоним випромінюванням ягід лохини від їх відносної вологості під час сушіння при різних температурах (швидкість повітря 0,8 см/с, вологовміст 8 г/кг сухого повітря)

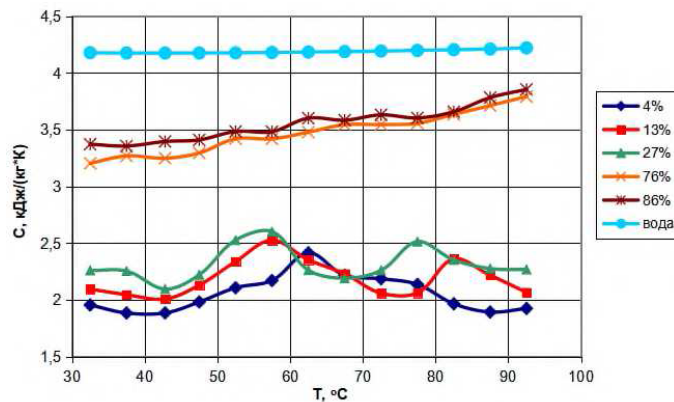


Рис. 5. Залежність теплоємності оброблених інфрачервоним випромінюванням ягід лохини від температури для зразків різної вологості

Отримані експериментальні дані з теплоємності та теплоти випаровування води з попередньо оброблених ягід лохини можна використати для розрахунку критеріїв оптимізації процесу сушіння та вибору на їх основі найбільш енергоефективного режиму сушіння з декількома температурними зонами у зонних сушарках.

Висновки

Аналіз існуючих літературних джерел показав, що переробка ягід лохини методом сушіння не достатньо проводилася в Україні. Через відсутність наукових даних є актуальними дослідження кінетики сушіння ягід лохини методом конвективного зневоднення, а також визначення енергетичних витрат під час переробки.

Застосування обробки інфрачервоним випромінюванням 3800 Вт/м² з одночасним конвективним сушінням свіжих ягід лохини дозволило скоротити загальну тривалість зневоднення в 1,2 рази відносно гіротермічної обробки. Найбільшої швидкості сушіння матеріал набуває при зменшенні $W^c = 50 \dots 18 \%$.

Експериментальне визначення теплоємності та теплоти випаровування води з попередньо оброблених ягід лохини показало надлишкові витрати енергії, а також на динаміку зміни ефективності сушіння матеріалу при значеннях вологості $W^c \leq 20\%$. Отримані дані можна використати для оптимізації енерговитрат на процес сушіння при застосуванні багатоступінчастої зонної сушки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Погожих М.І., & Пак А.О. (2015). Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини. Харків: ХДУХТ.
2. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів / Б. Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – Вип. 12. – С. 9–37.

3. *Балан А.* (2019). Сучасні знання — драйвер розвитку ягідного сектору України. *Ягідник*, 4, 10.
4. *Галат, Л. М.* (2021). Експортний потенціал та проблеми розвитку галузі ягідництва України. *Агросвіт*, 1-2, 46-55.
5. *Акуліч А.В., Гостіницікова Л.А.* Исследование кинетики процесса сушки ягодного сырья при различных способах энергоподвода. *Харчова наука і технологія*, 2 (23), 2013. С. 112-115.
6. *Tamás, A.* (2021). Effect of different drying techniques on the drying time and energy of blueberry. *Analecta Technica Szegedinensia*, 15(1), 23-30.
7. *Castagnini, J. M., Betoret, N., Betoret, E., & Fito, P.* (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 1289-1296.
8. *Wu, X., Zhang, M., & Bhandari, B.* (2019). A Novel Infrared Freeze Drying (IRFD) Technology to Lower the Energy Consumption and Keep the Quality of Cordyceps Militaris. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 54, 34-42.
9. *Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Граков О.П.* Теоретичний аналіз сучасного стану переробки ягід логістики відомими методами сушіння. *Наукові праці НУХТ* 2022. Том 28, №3. С.123-143. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-13.
10. *Petrova Zh., Slobodianiuk K., Grakov O.* Determination of the influence of pre-preparation of blueberries (*Vaccinium Corymbosum* L.) on the total duration of drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №2(122). 2023. P. 50-69.
11. *S. Ivanov, O. Dekusha, L. Vorobiov, L. Dekusha and Z. Burova*, "The Synchronous Thermal Analysis Cyber-Physical System for the Wet Materials Properties Study," 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 197-200, doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929763.
12. *ДСТУ ISO 11357-4:2010.* Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності.
13. *Bridle, P., & Timberlake, C.F.* (1997). Anthocyanins as natural food colours-selected aspects. *Food Chemistry*, 58, 103-109.
14. *Brownmiller, C., Howard, L.R., & Prior, R.L.* (2008). Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric color, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*, 73, 72-79.
15. *Paulo Díaz, Olivia Henríquez, Javier Enrione, Silvia Matiacevich.* Thermal transitions of pulp and cuticle of blueberries, *Thermochimica Acta*, Volume 525, Issues 1–2, 2011, Pages 56-61, ISSN 0040-6031

INFLUENCE OF COMBINED DRYING OF COLLOID CAPILLARY-POROUS MATERIALS ON ENERGY EXPENDITURES

Petrova Zh.O.¹, Dr. Sci. (Engin.),
Slobodianiuk K.S.², PhD (Engin.),
Ivanov S.O.³, PhD (Engin.), Grakov O.P.⁴, PhD

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

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, ironket@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3416-388X>*

³*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, teplomer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2722-7323>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD-student, grakovcom@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0743-2431>*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.5>

One of the berry crops that has recently gained popularity among consumers is blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). The berry is a powerful antioxidant, and besides, it contains fructose in its composition, which automatically refers it to the products of the diabetic diet. Therefore, blueberries become an interesting colloidal capillary-porous drying object. Wax on the skin of berries performs a protective function in the process of ripening, harvesting and transportation, but is a negative factor for the implementation of technological processing by artificial dehydration. The latter causes significant energy costs for the processing process. Therefore, the aim of the work is to determine the effect of combined drying of blueberry on energy consumption.

Experimental studies of the drying kinetics of blueberry were carried out on an experimental convective stand with forced recirculation of the coolant and infrared emitters, which was developed in IET of NAS of Ukraine. The effect of pre-developed hygrothermal and infrared treatment of fresh blueberries on the kinetics and change in the drying speed of berries was investigated. The use of infrared radiation made it possible to reduce the total duration of the dehydration process by 1.2 times.

The heat of evaporation of moisture from the samples and their heat capacity were investigated using the method created in IET of NAS of Ukraine installations of synchronous thermal analysis DMKI-01, which is intended for the study of colloidal capillary-porous materials. Determination of specific heat capacity was carried out according to the standardized method of step-by-step scanning DSTU ISO 11357-4:2010 in the temperature range from 30 to 95°C.

Experimental determination of heat capacity and heat of evaporation of moisture from pre-processed blueberry showed excess energy consumption for a possible phase transition of the waxy shell of the berry during drying and a decrease in the drying efficiency of the material at moisture values $W^e \leq 20\%$.

References 14, figure 5, table 1.

Keywords: blueberry, drying, wax, hygrothermal treatment, infrared radiation, heat of evaporation, specific heat capacity.

1. *Pohozhykh M.I., & Pak A.O. (2015). Enerhoefektyvni sposoby pererobky kharchovoi syrovyny: sushinnia plodovo-yahidnoi syrovyny [Energy-efficient methods of processing food raw materials: drying fruit and berry raw materials]. Kharkiv: KhDUKhT. (in Ukr.)*

2. *Haivas B. Matematychnе modeliuвання konvek- tyvnoho sushinnia materialiv z urakhuvanniam mekhanotermodyfuziinykh protsesiv [Mathematical modeling of convective drying of materials taking into account mechano-thermo diffusion processes]. Fizyko-matematychnе modeliuвання ta informatsiini tekhnolohii.– 2010. – Vyp. 12. – S. 9–37. (in Ukr.)*

3. *Balan A. (2019). Suchasni znannia — draiver rozvytku yahidnoho sektoru Ukrainy [Modern knowledge is a driver of the development of the berry sector of Ukraine]. Yahidnyk, 4, 10. (in Ukr.)*

4. *Halat, L. M. (2021). Eksportnyi potentsial ta problemy rozvytku haluzi yahidnytstva Ukrainy [Export potential and problems of development of the berry growing industry of Ukraine]. Ahrosvit, 1-2, 46-55. (in Ukr.)*

5. *Akulich A.V., Hostinshchikova L.A. Yssledovanye kynytyky protsessu sushky yahodnoho syria pry razlychnykh sposobakh enerhopodvoda [Study of the kinetics of the drying process of berry raw materials with various methods of energy supply]. Kharchova nauka i tekhnolohiia, 2 (23), 2013. S. 112-115. (in Rus.)*

6. *Tamás, A. (2021). Effect of different drying techniques on the drying time and energy of blueberry. Analecta Technica Szegedinensia, 15(1), 23-30.*

7. Castagnini, J. M., Betoret, N., Betoret, E., & Fito, P. (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 1289-1296.
8. Wu, X., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A Novel Infrared Freeze Drying (IRFD) Technology to Lower the Energy Consumption and Keep the Quality of Cordyceps Militaris. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 54, 34-42.
9. Petrova Zh.O., Slobodianiuk K.S., Hrakov O.P. Teoretychnyi analiz suchasnoho stanu pererobky yahid lokhyny vidomymy metodamy sushinnia [Theoretical analysis of the current state of blueberry processing using known drying methods]. *Naukovi pratsi NUKhT* 2022. Tom 28, No3. S.123-143. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-13. (in Ukr.)
10. Petrova Zh., Slobodianiuk K., Grakov O. Determination of the influence of pre-preparation of blueberries (*Vaccinium Corymbosum* L.) on the total duration of drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №2(122). 2023. P. 50-69.
11. S. Ivanov, O. Dekusha, L. Vorobiov, L. Dekusha and Z. Burova "The Synchronous Thermal Analysis Cyber-Physical System for the Wet Materials Properties Study," 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 197-200, doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929763.
12. DSTU ISO 11357-4:2010. Plastmasy. Dyferentsialna skanuvalna kalorymetriia. Chastyna 4. Vyznachennia pytomoi teploiemnosti. (in Ukr.)
13. Bridle, P., & Timberlake, C.F. (1997). Anthocyanins as natural food colours-selected aspects. *Food Chemistry*, 58, 103-109.
14. Brownmiller, C., Howard, L.R., & Prior, R.L. (2008). Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric color, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*, 73, 72-79.
15. Paulo Díaz, Olivia Henríquez, Javier Enrione, Silvia Matiacevich Thermal transitions of pulp and cuticle of blueberries, *Thermochimica Acta*, Volume 525, Issues 1–2, 2011, Pages 56-61, ISSN 0040-6031

Отримано 12.04.2023

Received 12.04.2023

УДК 662.99:621.184.5

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКОЛОГОЕФЕКТИВНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК
КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИФіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Абдулін М. З.⁴¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com⁴докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук співр.; докт. техн. наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, професор, orcid.org/0000-0001-9900-7314, e-mail: mzabdulin@gmail.com<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.6>

Наведено результати теплових розрахунків опалювального котла з системою рециркуляції в його топковий простір відхідних газів в суміші з дуттьовим повітрям. Встановлено закономірності зміни адіабатної температури горіння і тепловологісних характеристик суміші в залежності від часток рециркуляції та теплового навантаження котла.

The thermal calculation results of a heating boiler with a recirculation system into its furnace space of exhaust gases mixed with blown air are presented. The change regularities of the combustion adiabatic temperature and mixture heat and humidity characteristics depending parts of the recirculation and the heat load boiler are established.

Бібл. 7, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: газоспоживальні котельні установки, димові гази, рециркуляція, конденсатоутворення в повітроводах. B – витрата газу, кг/с; K – відносне навантаження котла, %; T, t – температура, °С; X – вологовміст газів, кг/кг с.г.; Δt – перепад температур, °С; σ – частка рециркуляції, %;**Індекси:**

ад – адіабатна;

в – вода;

від – відхідний;

г – гази;

нс – навколишнє середовище;

о – опалення;

п – паливо;

пр – пряма;

р – роса;

с – суміш.

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоносіїв та всіх видів природних ресурсів, а також зростаючими вимогами щодо охорони навколишнього середовища від впливу паливоспоживальних енергетичних об'єктів комунальних та промислових підприємств. З огляду на це, всіляке удосконалення енерготехнологій в таких пріоритетних напрямках, як заощадження палива та підвищення екологічності є дуже важливим для розвитку енергетичного господарства України.

На сьогодні проблема енергозбереження в комунальній теплоенергетиці певною мірою вирі-

шується шляхом утилізації теплоти продуктів згоряння палива в котельних установках. Перспективним напрямом щодо покращення екологічних показників цих установок є напрям зниження емісії оксидів азоту методом рециркуляції димових газів в топковий простір котла. Зниження емісії досягається шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Згідно з дослідженнями [1–6], рециркуляція забезпечує для газоспоживальних котлів зниження до 70% викидів оксидів азоту з їхніми відхідними газами.

Особливістю впровадження методу рециркуляції димових газів є той факт, що він не потребує модернізації

основного устаткування, додаткової площі, зміни технологічного процесу тощо [5]. Даний метод зазвичай реалізується введенням в топку котла газів рециркуляції з температурою 300–400 °С, які відбираються перед повітрянагрівачем котла. Для котельних установок, які не обладнані повітрянагрівачами, рециркуляція здійснюється шляхом додаванням до дуттьового повітря частини відхідних газів котла [5]. При цьому без застосування спеціальних заходів за низьких температур навколишнього середовища можливе обмерзання повітроводів та вентилятора котельної установки [6, 7]. Тобто надійна експлуатація котельної установки не може бути забезпечена в усіх режимах котла.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у дослідженні тепловологісних режимів експлуатації повітропідвідних трактів котельних установок з системами рециркуляції відхідних газів у дуттьове повітря.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

Табл. 1. Основні характеристики котла в номінальному режимі

Найменування параметра	Значення
Теплопродуктивність МВт	2,0
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Температура води на вході, °С	70
Температура води на виході, °С	95
ККД, %	81,6
Витрата природного газу, м³/год	224
Температура відхідних газів, °С	160

- виконати тепловий розрахунок котла з рециркуляцією його відхідних газів у дуттьове повітря;
- дослідити тепловологісні показники суміші холодного повітря і рециркульованих димових газів.

Методика проведення досліджень.

Використовувалися відомі методи теплового розрахунку котельних установок та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [7–9].

Розрахункові дослідження виконувались для газотрубного опалювального котла теплопродуктивністю 2 МВт, що працює на природному газі. Характеристики котла в номінальному режимі експлуатації наведено в табл.1. ККД котла розраховувався за вищою теплотою згоряння палива.

Технологія рециркуляції димових газів реалізовувалась шляхом введення у газопальниковий пристрій котла частини відхідних газів у суміші з дуттьовим повітрям. На рис. 1 зображено принципову схему такої котельної установки.

Котельна установка містить котлоагрегат з газопальниковим пристроєм, сполучений відвідним газоходом з димовою трубою через димосос; газопальниковий пристрій сполучений повітроводом з атмосферою через вхідний патрубок і вентилятор. Відвідний газохід з'єднаний газоходом рециркуляції з ділянкою повітроводу на всмоктувальній стороні вентилятора. Технічна реалізація котельної установки передбачає, що її котлоагрегат підключений до споживача теплової енергії подавальним трубопроводом і зворотним трубопроводом з мережним насосом з утворенням водяного циркуляційного контуру системи тепlopостачання.

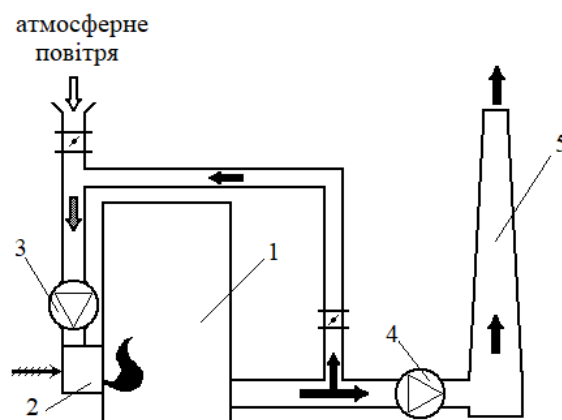


Рис. 1. Принципова схема котельної установки з системою рециркуляції димових газів:

1 – котел; 2 – газопальниковий пристрій; 3 – дуттьовий вентилятор; 4 – димосос; 5 – димова труба;
 ↘ природний газ; → димові гази від котла; ⇐ атмосферне повітря; → газоповітряна суміш

При виконанні досліджень відносна теплова продуктивність котла K коливалась в межах від 100 до 30% протягом опалювального періоду згідно зі зміною температури атмосферного повітря від -30 до $+10$ °С. Дослідження здійснювались для системи опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища -30 °С та температурним перепадом теплоносія $\Delta t_0 = 25$ °С.

Тепловий розрахунок котла виконувався у різних режимах його експлуатації при частках σ рециркуляції димових газів від 10 до 20% для двох розглянутих в роботі ситуацій, а саме: при дотриманні витрати газу на котел в кожному режимі на рівні її значення без застосування системи рециркуляції ($B_n = \text{const}$), або при дотриманні теплового графіка котельні згідно необхідних температур нагріваної прямої води котла ($T_{np}^b = \text{const}$). Визначалися адіабатні температури горіння в топковому просторі котла та температури $t_{\text{сум}}$ суміші повітря та рециркульованих газів і її точки роси $t_{\text{р}}^{\text{сум}}$ за різних часток σ відбору димових газів для обох розглянутих варіантів. Для розрахунку вказаних тепловолісних показників використовувались результати теплового розрахунку котла щодо значення температури відхідних газів та їхнього вологовмісту, а також дані щодо вологовмісту

повітря відповідно до температур навколишнього середовища протягом опалювального періоду.

В роботі для виконання розрахункових досліджень теплових та вологісних режимів котельних установок з системами рециркуляції димових газів було створено відповідне програмне забезпечення. Результати виконаних досліджень щодо адіабатної температури горіння при витраті B_n природного газу на котел, що відповідає в кожному режимі його значенню без застосування рециркуляції ($B_n = \text{const}$), наведено на рис. 2.

Результати досліджень свідчать, що введення газів рециркуляції в топковий простір котла за даних умов зумовлює зниження на $150\text{--}250$ °С адіабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ через необхідність витрати теплоти палива на підігрівання введеного баласту. І чим більша частка рециркуляції σ , тим нижчий рівень зазначеної температури.

За результатами досліджень рециркуляція димових газів зумовлює також невеликі зміни в температурі відхідних газів котла $t_{\text{від}}^{\text{г}}$. В табл. 2 наведено відповідні дані за умов збереження витрати газу на котел на рівні значення цієї витрати без застосування рециркуляції, тобто за умови $B_n = \text{const}$.

Таблиця 2. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів при $B_n = \text{const}$

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$, °С при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{св}}$, °С								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	159,9	148,0	138,8	128,9	118,6	107,1	94,5	80,6	64,8
10	158,4	149,7	140,3	130,6	120,3	108,9	96,5	82,6	66,9
15	158,9	150,0	140,9	131,3	121,0	109,7	97,3	83,5	67,8
20	159,3	150,5	141,4	131,8	121,7	110,4	98,0	84,2	68,8

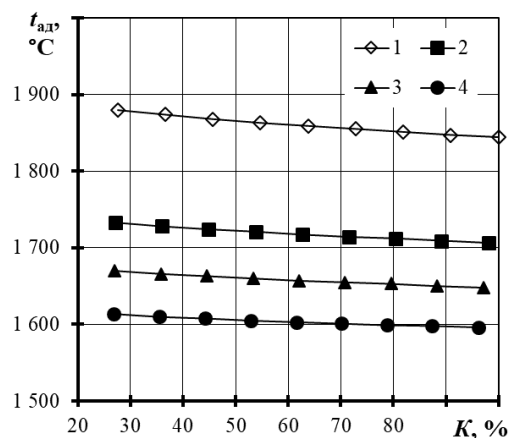


Рис. 2. Залежність адіабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ від відносного теплового навантаження K котла при різних частках σ рециркульованих газів та $B_n = \text{const}$: 1 – $\sigma = 0$ %; 2 – 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %

Як видно з табл. 2, за умови $B_{\text{п}} = \text{const}$ температура $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ відхідних газів котла дещо знижується ($\approx 0,5^{\circ}\text{C}$) у номінальному режимі (при найнижчій температурі атмосферного повітря опаловального сезону) та підвищується (до $4,0^{\circ}\text{C}$) при мінімальному навантаженні котла ($\approx 30\%$), що відповідає найвищій температурі повітря вказаного сезону. Виконані теплові розрахунки також засвідчили, що за умови $B_{\text{п}} = \text{const}$ знижується температура $T_{\text{в}}^{\text{пр}}$ нагріваної в котлі прямої води системи теплопостачання порівняно з необхідною за розрахунковим тепловим графіком котельні. Тому проведено відповідні теплові розрахунки котла при дотриманні рівня температури нагріваної в ньому води згідно з тепловим графіком ($T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$). В табл. 3 наведено дані щодо температурних показників відхідних газів за умови $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$. Як показали результати, за цієї умови збільшується витрата газу на котел $B_{\text{п}}$. Результати також свідчать, що при $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$ температура відхідних газів за котлом підвищується на $1,4 - 4,7^{\circ}\text{C}$ через збільшення витрати газу.

Визначено також значення вологовмісту відхідних газів котла за умов застосування рециркуляції димових газів (табл. 4). Слід зауважити, що цей вологовміст не залежить від частки рециркулювання цих газів σ , а визначається лише режимом експлуатації котла.

З використанням отриманих даних щодо температури та вологовмісту відхідних газів визначено тепловологісні характеристик повітрягазової суміші, що надходить в топку котла, для двох розглянутих ситуацій. Рисунок 3 ілюструє результати зіставлення вказаних характеристик для кожної з розглянутих часток σ .

Таблиця 3. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркулюваних газів при $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$, $^{\circ}\text{C}$ при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{св}}$, $^{\circ}\text{C}$								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	159,9	148,0	138,6	128,6	119,3	110,0	99,7	88,3	75,6
10	159,3	150,3	140,9	130,9	121,9	112,6	102,4	91,0	78,1
15	160,3	151,3	142,0	132,0	123,0	113,7	103,5	92,2	79,2
20	161,3	152,3	142,9	133,0	124,0	114,8	104,6	93,2	80,3

Таблиця 4. Вологовміст відхідних газів $X_{\text{від}}^{\text{г}}$ в різних режимах експлуатації котла в залежності від температури навколишнього середовища

Частка рециркуляції σ , %	Вологовміст вихідних газів $X_{\text{від}}^{\text{г}}$, г/кг с.г. при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{св}}$, $^{\circ}\text{C}$								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0 - 20	139,6	139,6	139,7	139,7	139,8	139,9	140,0	140,0	140,4

Як видно з наведених даних, температура $t_{\text{сум}}$ суміші газів та її точка роси $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$ підвищується при застосуванні рециркуляції газів і тим більше, чим більша частка рециркулювання σ . Відмінності у значеннях $t_{\text{сум}}$ та $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$ для двох розглянутих ситуацій (з $B_{\text{п}} = \text{const}$ та $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$) є незначними через невеликі розбіжності в температурах відхідних газів котла в цих ситуаціях (див. табл. 2, 3).

Результати виконаних досліджень засвідчили також, що в усіх режимах котла, які відповідають його теплопродуктивності в залежності від температури навколишнього середовища, спостерігається зниження температури суміші $t_{\text{сум}}$ нижче точки роси $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$. Тобто, в усіх режимах котла матиме місце конденсатотворення на внутрішніх поверхнях підвідних повітроводів та у вентиляторі. А при температурах навколишнього середовища, менших за 0°C , коли температура повітрягазової суміші $t_{\text{сум}}$ приймає від'ємні значення, можливе обмерзання вказаних поверхонь, що розміщені на відкритих майданчиках.

Наведені на рис. 3 результати досліджень свідчать, що зниження температури повітрягазової суміші $t_{\text{сум}}$ нижче 0°C при $\sigma = 10\%$ відбувається за відносних навантажень котла $K > 70\%$, при $\sigma = 15\%$ відповідно за $K > 80\%$, а при $\sigma = 20\%$ мінусові значення $t_{\text{сум}}$ не спостерігаються. При експлуатації повітроводів та вентиляторів на відкритих площадках через випадення конденсату на внутрішніх поверхнях вказаних елементів котельних установок відбуватиметься обмерзання цих поверхонь при зниженні їх температури $t_{\text{п}}$ нижче 0°C . Температура $t_{\text{п}}$ внутрішньої поверхні застосовуваних повітропроводів залежить від умов теплообміну цієї

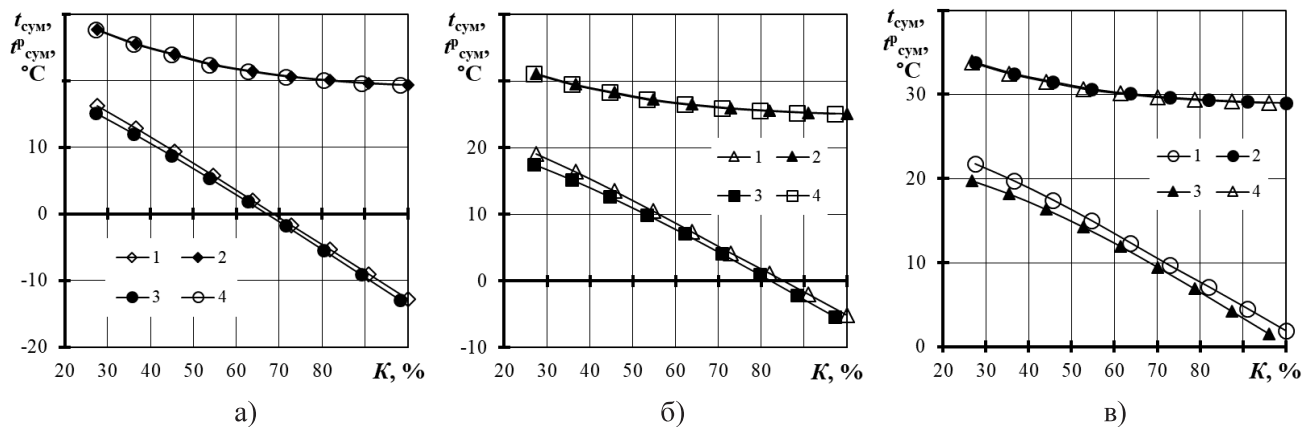


Рис. 3. Залежність від відносного навантаження котла K температури $t_{\text{сум}}$ (1, 3) та точки роси $t_{\text{р сум}}$ (2, 4) суміші дуттьового повітря та рециркульованих газів при різних частках σ рециркуляції газів від котла при $T_{\text{г}}^{\text{нр}} = \text{const}$ (1, 2) та при $B_{\text{н}} = \text{const}$ (3, 4): а) $\sigma = 10\%$; б) $\sigma = 15\%$; в) $\sigma = 20\%$

поверхні з навколишнім середовищем, який здебільшого визначається режимом роботи котла, конструкційними особливостями повітроводів та їхнім розміщенням. Через втрати тепла в навколишнє середовище $t_{\text{п}}$ є зазвичай нижчою температури суміші $t_{\text{сум}}$ і через випадення конденсату у повітроводах їхнє обмерзання наступатиме при менших навантаженнях котла K і вищих частках рециркуляції газів σ , зокрема і при $\sigma = 20\%$.

Отримані дані свідчать, що для запобігання конденсатоутворенню і обмерзанню поверхонь підвідних повітроводів котла необхідно застосовувати заходи щодо підвищення температури газоповітряної суміші на величину не меншу $\Delta t_{\text{сум}} = 15 - 35^\circ\text{C}$ в залежності від режиму роботи котла та часток рециркуляції σ . Причому більші рівні підвищення $\Delta t_{\text{сум}}$ відповідають нижчим температурам навколишнього середовища і більшим навантаженням котла.

Висновки.

1. Виконано теплові розрахунки опалювального котла з системою рециркуляції його відхідних газів в топковий простір в суміші з дуттьовим повітрям. Встановлено закономірності зміни адиабатної температури горіння та температури відхідних газів котла в залежності від величин часток рециркуляції димових газів та теплового навантаження котла в різних режимах його експлуатації протягом опалювального періоду. Показано, що введення газів рециркуляції з дуттьовим повітрям в топковий простір котла викликає:

- суттєве зниження (на $150-250^\circ\text{C}$) адиабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ через необхідність витрати теплоти палива на підігрівання введених баластних газів. І чим більша частка цих газів, тим нижчий рівень зазначеної температури;

- невелике підвищення ($\approx 1,4 - 4,7^\circ\text{C}$) температури відхідних газів котла $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ за умови дотримання температури прямої води котла відповідно до теплового графіка котельні, що викликає необхідність збільшення витрати палива на котел;

- незначне зниження ($\approx 0,5^\circ\text{C}$) температури відхідних газів котла у номінальному режимі та підвищення цієї температури (до $4,0^\circ\text{C}$) при мінімальному навантаженні котла ($\approx 30\%$) за умов збереження витрати газу, що відповідає в кожному режимі його значенню без застосування рециркуляції.

2. Встановлено закономірності зміни тепловологісних характеристик (температури та точки роси) суміші рециркульованих газів і повітря в різних режимах котла протягом опалювального періоду та за різних часток рециркульованих газів. Встановлено, що:

- застосування системи рециркуляції призводить до зниження температури повітрогазової суміші нижче її точки роси у всіх режимах експлуатації котла;

- у деяких режимах відбувається зниження температури суміші нижче 0°C , що зумовлює обмерзання поверхонь повітроводів, які експлуатуються на відкритих майданчиках.

- для запобігання конденсатоутворенню та обмерзанню повітроводів необхідно застосовувати заходи щодо підвищення температури газоповітряної суміші на величину не меншу за $\Delta t_{\text{сум}} = 15 \dots 35^\circ\text{C}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Леценко В.В., Харченко Р.Ю., Ложечнікова Н.В. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах судових парових котлів. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2020. Т.10, №3–4. С. 154–166. DOI 10.15276/imms.v10.no 3-4.154
2. Сигал И.Я., Дубошій А.Н., Сигал А.И., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции на снижение выбросов оксидов азота котлами электростанций. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2010. №1. С.48–52.
3. Горбань К.С., Сірий О.А., Абдулін М.З. Можливості впливу струменево-нішової технології на екологічні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2(6). С. 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02
4. Епифанов А.А., Дымо В.В., Пацурковский П.А., Язловецкий А.В. Влияние рециркуляции дымовых газов на технические и экологические показатели работы судового вспомогательного котла. Shipbuilding & marine infrastructure. 2020. №2 (14). С. 4–16. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).1)
5. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31, № 4. С. 5–11.
6. Евсеев Г.А., Евсеев А.Г., Капичников А.А., Ткач В.А. Система рециркуляции дымовых газов водогрейных теплофикационных котлов ПТВМ-50. URL: <http://www.rnkt.ru/year/2006/lib/1-249.pdf>
7. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Степанова А.І., Гнедаш Г.О. Підвищення надійності котельних установок з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2022. №14. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419>

OPERATION FEATURES OF ENVIRONMENTALLY EFFICIENT BOILER PLANTS OF MUNICIPAL THERMAL POWER ENGINEERING

Fialko N.M.¹, Navrodska R.², Shevchuk S.³, Abdulin M.⁴

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net

⁴Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057; Dr. Sci. (Engin.), Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine, Professor, orcid.org/0000-0001-9900-7314, e-mail: mzabduln@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.6>

The work is devoted to research on the improvement of thermal energy production technologies in gas-consuming heating boiler installations while improving their environmental performance and increasing the operation reliability. The work purpose is to study the heat and humidity modes of the air-supply ducts of boiler plants with exhaust gases recirculation systems into the blown air. The main objectives of the study are: to determine the thermal parameters of a heating boiler with a 2 MW heating capacity with a exhaust gases recirculation system mixed with blown air into its furnace space under conditions of using heat recovery technologies and without them; determination and analysis the heat and humidity parameters of this mixture in different operating modes of boiler plants. Known thermal calculation methods of boiler plants and data from our own experimental studies of heat transfer during deep cooling of boiler plant exhaust gases were used. The thermal calculation results of the heating boiler with a system for exhaust gas

recirculation into its furnace space mixed with blown air are presented. The regularities of changes in the adiabatic combustion temperature and heat-humidity characteristics of the above mixture depending on the boiler heat load in different its operation modes during the heating period and the share of flue gas recirculation from 10 to 20 % were established. The research results show that the introduction of recirculation gases leads to a decrease by 150 – 250 °C of the adiabatic combustion temperature t_{ad} due to the need to consume fuel heat for heating the introduced ballast and the greater of the recirculation share σ the lower the level of the indicated temperature. The research results also showed that gas recirculation causes insignificant (in the range of 0.5 – 4.7 °C) changes in the temperature of the boiler exhaust gases. Based on the data obtained, the change regularities in the heat-humidity characteristics (temperature and dew point) of the mixture of recirculated gases and air in different boiler operating modes during the heating period and under the studied recirculation shares were established. It is shown that recirculation causes condensate formation on the surfaces of air ducts in all operating modes of boiler and in some modes their icing is possible. To prevent these negative phenomena, it is necessary to apply measures to increase the temperature of the gas-air mixture by a value not less than $\Delta t_{sum} = 15 - 35$ °C.

References 7, tables 4, figures 3.

Keywords: gas-consuming boiler plants, flue gases, recirculation, condensation formation in air ducts.

1. Mikhailenko V.S., Shcherbinin V.A., Leshchenko V.V., Kharchenk R.Yu., Lozhechnikova N.V. [Modeling the process of hazardous emissions formation in the exhaust gases of ship's steam boilers]. Informatics and Mathematical Methods in Simulation. 2020. V.10, №3–4. P. 154–166. DOI 10.15276/imms.v10.no 3-4.154 (in Ukr.)

2. Sigal I.Ya., Duboshyi A.N., Sigal O.I., Smikhula A.V. [Increase of Smoked Gases Recirculation Influence on Nitrogen Oxides Emission from Power Plant Boilers Reduction]. Energy Technologies & Resource Saving. 2010. №1. P.48–52. (in Rus.)

3. Horban K., Siryi O., Abdulin M. [Jet-niche technology influence potential on the economic and operating parameters of the fire-engineering equipment]. NTU "KhPI" Bulletin: "Power and heat engineering processes and equipment". 2021. №2(6). P. 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02 (in Ukr.)

4. Yepifanov A.A., Dymo B.V., Patsurkovskyi P.A., Yazlovetskyi A.V. [Influence of flue gases recirculation on technical and ecological indicators of ship auxiliary boiler performance]. Shipbuilding & marine infrastructure. 2020. №2 (14). P. 4–16. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).1) (in Rus.)

5. Kobzar S.H., Khalatov A.A. Snizhenie vybrosov oksidov azota v gazovykh kotlakh metodom retsirkuliztsii dymovykh gazov [Reduction of nitrogen oxide emissions in gas-fired boilers by flue gas recirculation]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2009. V. 31, № 4. P. 5–11. (in Rus.)

6. Yevseev H.A., Yevseev A.H., Kapichnikov A.A., Tkach V.A. Sistema reysirkuliatsii dymovykh gazov vodohreynykh teplofikatsionnykh kotlov STWM-50 [Flue gas recirculation system of hot water heating boilers STWM-50]. URL: <http://www.rnkt.ru/year/2006/lib/1-249.pdf> (in Rus.)

7. Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I., Gnedash G.O. [Improving the reliability of boiler plants with recirculation and heat recovery of exhaust gases]. *International Scientific Journal “Internauka”*. 2022. №14. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419> (in Ukr.)

Отримано 07.02.2023

Received 07.02.2023

УДК 662.614.2:661.975:669.18

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ РОЗІГРІВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ АГРЕГАТІВ**Петрик О.А.¹**, канд. техн. наук., **Назаренко І.А.²**, канд. техн. наук¹Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна, доцент, iternell17@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5824-6287>²Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна, доцент, irinan842@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424><https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.7>

В статті наведено результати досліджень факторів, що впливають на стійкість склепіння високотемпературних агрегатів. Розраховано тепловий баланс, на основі якого розроблено новий раціональний режим розігрівання, що дозволить забезпечити рівномірний температурний градієнт по всій поверхні склепіння, а також простору печі. Оцінено зниження палива на процес розігрівання.

The article presents the results of studies of factors affecting the stability of the vault of high-temperature aggregates. The thermal balance was calculated, on the basis of which a new rational heating mode was developed, which will ensure a uniform temperature gradient over the entire surface of the vault, as well as the space of the furnace. Estimated reduction of fuel for the heating process.

Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: тепловий режим, нагрівання, тепловий баланс, прихід теплоти, паливо, теплота.

ΔН - надлишок теплоти;

М_{прих} - кількість теплоти, що приходить;М_{витр} - кількість теплоти, що витрачається;

ГДж – одиниці виміру кількості теплоти.

Вступ

Однією з головних проблем сучасного світу є пошук економії енергоресурсів, а саме палива. Високотемпературні печі є одними з найбільших споживачів палива. Теплотехнологічна установка (під-агрегат), являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію.

Верхня частина огороження реактора (робочого простору) називається склепінням. Склепіння – це елемент, що визначає стійкість агрегату загалом і впливає на техніко-економічні показники виробництва.

На печах з інтенсивним продуванням ванни киснем стійкість склепіння становить близько 300 плавов. У процесі технологічного процесу на склепіння печі впливають такі фактори:

- нерівномірність нагрівання внутрішньої поверхні склепіння по довжині та ширині внаслідок нерівномірності температурного поля факела при розігріванні агрегату;
- коливання температури ходу залежно від технологічних періодів;
- зміна хімічного та фазового складів вогнетривкого матеріалу склепіння в результаті впливу бризок шлаку та металу, плавильного пилу та газової атмосфери робочого простору печі.

Інтенсифікація теплового та технологічного режимів сприяє посиленню та прискоренню дії вищевказаних процесів. Тому питанню якісного розігрівання склепіння агрегату треба приділяти особливу увагу [1].

Методика проведення дослідження

Розглянемо схему потоків теплоти у високотемпературному агрегаті [2] при його розігріванні (Рис.1).

Тепловий баланс буде мати вигляд:

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{витрат}} \quad (1)$$

Прихід теплоти розраховується по наступній формулі:

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{Хім.т}} + M_{\text{Фіз.т}} + M_{\text{Фіз.пов}}, \quad (2)$$

де М_{Хім.т} - хімічна теплота палива, ГДж;

М_{Фіз.т} - фізична теплота палива, ГДж;

М_{Фіз.пов} - фізична теплота повітря, яке надійшло на горіння, ГДж.

Витрати теплоти розраховуються по наступній формулі:

$$M_{\text{витрат}} = M_{\text{нагрів}} + M_{\text{відх}} + M_{\text{охол.к}} + M_{\text{охолш}} + M_{\text{ок}} + M_{\text{винром}} + M_{\text{винб.г}} + M_{\text{підсм}}, \quad (3)$$

де М_{нагрів} - витрати теплоти на нагрів склепіння, ГДж;

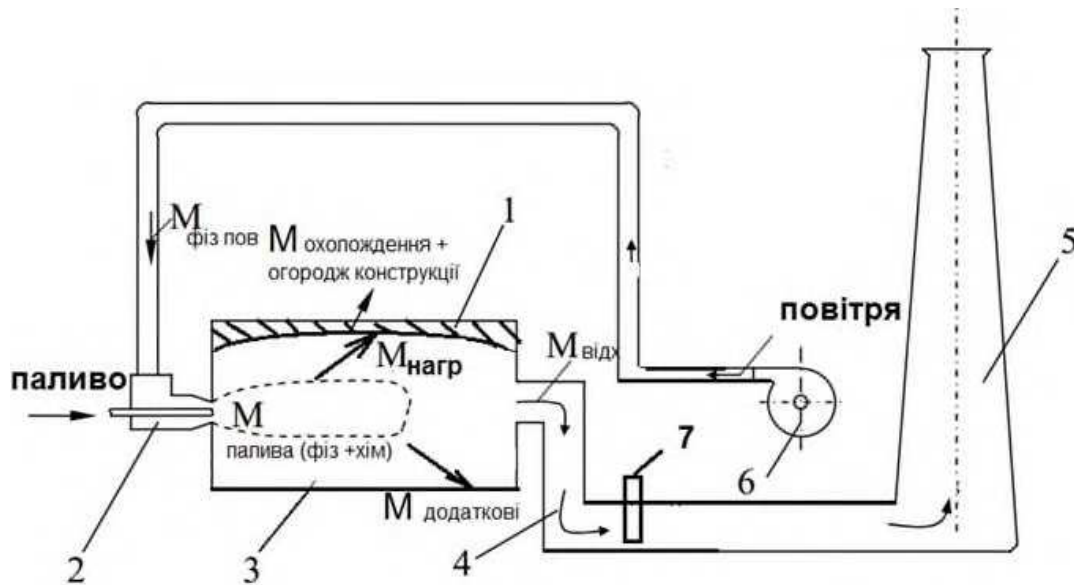


Рис. 1. Потоки теплоти у високотемпературному агрегаті при розігріві:
 1 – робочий простір печі; 2 – пальник; 3 – склепіння; 4 – димовий канал; 5 – димова труба;
 6 – вентилятор; 7 – димовий шибер

$M_{\text{відх}}$ - витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, ГДж;

$M_{\text{охол.к}}$ - витрати теплоти на охолодження кришок завальочних вікон, ГДж;

$M_{\text{охол.ш}}$ - витрати теплоти на охолодження шиберів, ГДж;

$M_{\text{ок}}$ - витрати теплоти через огорожувальні конструкції, ГДж;

$M_{\text{випром}}$ - витрати теплоти випромінюванням через відчинені вікна й гляділки, ГДж;

$M_{\text{виб.г}}$ - витрати теплоти з газами, що вибиваються, ГДж;

$M_{\text{підсм}}$ - витрати теплоти від холодного повітря, що підсмоктується в піч, ГДж.

Оцінка надлишку теплоти проводиться по наступній формулі:

$$\Delta H = M_{\text{вitr}} - (M_{\text{вitr}} - M_{\text{прих}}) * 100\% / M_{\text{прих}} \quad (4)$$

Варто відзначити, що при $\Delta H > 0$ – є присутній надлишок прибуткової частини теплоти, тобто в агрегат вноситься більше теплоти, ніж споживається, що у свою чергу йде на збільшення втрат; при $\Delta H < 0$ - в агрегат вноситься менше теплоти, ніж необхідно для забезпечення нормальної теплової роботи агрегату (агрегат працює з недоліком теплоти), що у свою чергу призводить до неякісного прогрівання склепіння. Найбільш раціонально вести тепловий баланс плавки з надлишком теплоти в діапазоні до 2,5 % [3].

Результати досліджень

Розрахувавши тепловий баланс (таблиця 1) нагріву склепіння відповідно до класичного графіку розігрівання [3] і методики [2] відзначимо присутність профіциту теплоти. На підставі отриманих результатів і наявності надлишку теплоти в прибутковій частині розрахунковим шляхом виконаємо підбір тривалості й витрат палива для нового графіку (нового теплового режиму). Результати розрахунків зведено в таблицю 1.

Слід зазначити, що у пічній системі, витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, складаються з фізичної теплоти гарячих газів, що відходять, та їх об'єму [2]. При цьому на них має істотний вплив швидкість газів, що відходять.

Щоб мати змогу знизити витрати палива при розігріванні високотемпературного агрегату, треба знизити втрати теплоти з димовими газами, що відходять. Одним із шляхів є зменшення швидкості продуктів згоряння шляхом зменшення розрідження (на 20-25%) в димовому тракті (газів, що йдуть на димову трубу), за допомогою керування системою димових шиберів.

Виконаний порівняльний аналіз розігрівання дослідного та базового варіантів режимів розігрівання. З аналізу встановлене наступне:

- тривалість розігрівання знижено на 4 години або на 12,5 % (з 32 до 28 години);
- витрата палива знижена на 234,9 ГДж або 10,7 % (з 2014,9 до 1780,0 ГДж);

• витрата теплоти з газами, що відходять, знижено на 212,7 ГДж або 19,7 % (з 1079,0 до 866,0 ГДж).

При цьому нев'язку по балансу знижено на 5,59 % (з 5,59 до 0 %).

Дані Таблиці 1 свідчать про істотне поліпшення показників нагрівання агрегату, корисно використовувати тепло агрегату зростає, а витрати палива знижуються.

Отримані результати дозволяють впритул підійти до питання побудови нового раціонального графіка розігрівання склепіння високотемпературного агрегату.

Табл. 1. Тепловий баланс агрегату при розігріванні

№ п/п	Прихід теплоти	Класичний графік нагрівання 32 год		Запропонований графік нагрівання 28 год		№ п/п	Витрата тепла	Класичний графік нагрівання 32 год		Запропонований графік нагрівання 28 год	
		ГДж	%	ГДж	%			ГДж	%	ГДж	%
1	Хімічна теплота палива	2014,9	93,7	1780	93,8	1	На нагрів склепіння	559,3	27,56	559,3	29,4
2	Фізична теплота палива	2,0	0,1	2,0	0,1	2	З газами, що відходять	1079	53,15	866,0	45,6
3	Фізична теплота повітря, що надійшло на горіння	132,7	6,2	116	6,1	3	На охолодження кришок завалочних вікон	67,0	3,30	58,7	3,09
						4	На охолодження шиберів	24,1	1,19	21,1	1,11
						5	Через огорожувальні конструкції	211,3	10,41	189,4	9,98
						6	Випромінюванням через відкриті вікна та гляділки	7,1	0,35	6,9	0,36
						7	З газами, що вибиваються	60,4	2,98	178,0	9,38
						8	від холодного повітря, що підсмоктується в піч	21,3	1,05	18,6	0,98
	Загальний прихід теплоти	2149,5	100	1898	100		Сумарні теплові витрати	2029,4	100	1898,0	100
нев'язка балансу класичний графік							5,59%				
нев'язка балансу запропонований графік							0,0%				

Що дозволить знизити витрати палива на нагрівання, а також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим.

Згідно [3, 7] розігрівання сталеплавильних печей після повної заміни склепіння здійснюється за 32 годинними графіками. Швидкість розігрівання при постійній подачі палива складає 55-75 °С/год. Підймання температури склепіння здійснюється безперервно та без температурних витримок, що не враховує виникаючі в процесі розігрівання внутрішні механічні напруження вогнетривких матеріалів, що виникають внаслідок

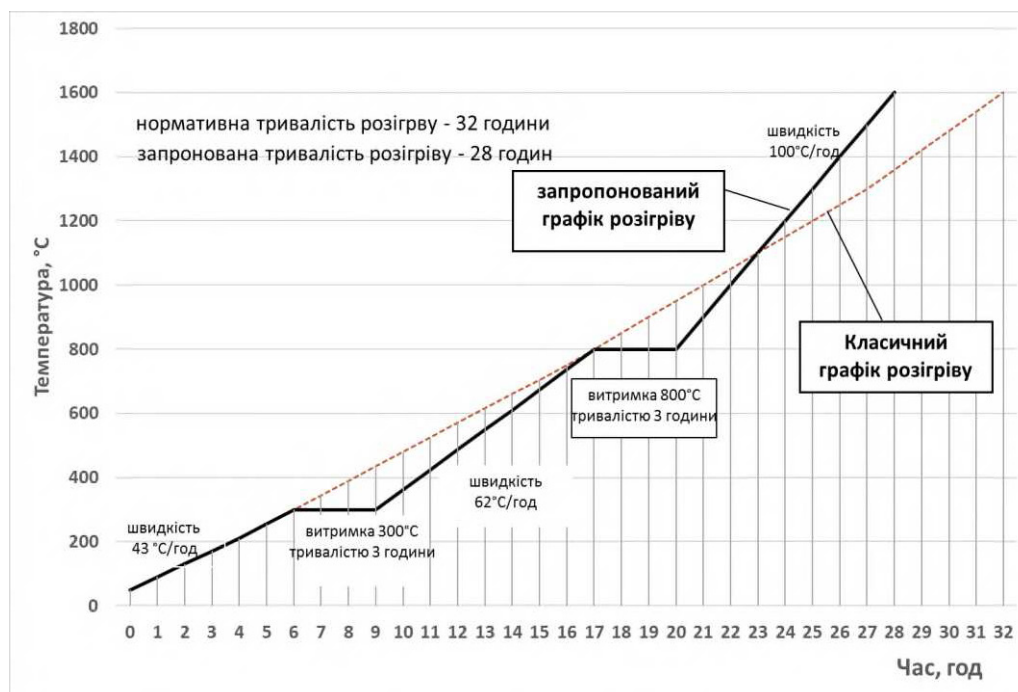


Рис. 2. Графік розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією (1) та запропонований (2)

підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромітових вогнетривких виробів, пов'язаних з їх перекристалізацією в інтервалах 300-350 °C і 800-850 °C, що може призвести до утворення тріщин і, як наслідок, сколювання склепін в процесі подальшої експлуатації, зниження стійкості головного склепіння.

На основі розрахунків, в основі яких лежать рівняння теплового балансу високотемпературного агрегату [2,6], а також рекомендації [3,4,8] щодо розігріву вогнетривких виробів, розроблено новий раціональний режим розігрівання. Графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією [3, 7] та запропонований приведено на рис. 1.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

На основі досліджень, в основі яких лежать рівняння теплового балансу високотемпературного агрегату, розроблено новий раціональний режим розігрівання.

Згідно запропонованого температурного режиму швидкість розігрівання при диференціальній подачі палива складає: з 1 по 6 годину - 43 °C/год, витримка при температурі 300°C (тривалістю 3 години), з 9 по 17 годину - 62 °C/год, витримка при температурі 800°C (тривалістю 3 години), з 20 до 28 години -100 °C/год.

За розрахунками, кількість теплоти, що необхідно підвести до склепіння, щоб його нагріти складає:

- за класичною технологією - 13 ГДж/м²,
- за новою технологією – 11,6 ГДж/м² (зниження на 1,4 ГДж/м² або 10,7%).

Новий тепловий режим розігріву склепіння печі дозволить забезпечити рівномірний температурний градієнт по всій поверхні склепіння, а також простору печі: з витримкою на 300°C і 800°C в зонах підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромітових виробів. При цьому зниження палива складає 10,7%.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ревун М.П., Чепрасов О.І. Математичне моделювання нагріву металу в печі (повідомлення 2) // *Металургія: наукові праці ЗДІА.- Запоріжжя: ЗДІА, - 2011. – № 23. - С. 163-171.*
2. Губинський В.Й. *Металургійні печі: Навч. посібник.* - Дніпро: НМетАУ, 2006. - 85 с.
3. *Сушіння та розігрів печей* [Електронний ресурс]; Україна, 2016. - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9329465/page:3>
4. Сущенко А.В. Порівняльний аналіз методик розрахунку матеріального та теплового балансів киснево-конвертерної плавки // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ.- Маріуполь, 2013. - Вип. 27. - С. 17-29.*

5. Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчеты нагревательных и термических печей: справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.

6. Губинський В.Й. Нагрівальні печі металургії – сьогодні та завтра // Теорія і практика металургії, - 2004. – № 6. - С. 56-60.

7. Рыженков А.Н., Крикунов Б.П., Петров Ю.В. Патент Украины, № 20930. Способ управления тепловым режимом сталеплавильной печи. – Опубл. 15.02.2007. Бюл. № 2.

8. Терещенко М.О., Горський А.М. Вогнетривких матеріалів промисловість // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс]; НАН України, НТШ.– К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2005. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-35277>

IMPROVEMENT OF THERMAL MODES OF WARMING UP HIGH-TEMPERATURE UNITS

Petryk O.A.¹, Nazarenko I.A.²

¹PhD (Engin.), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, orcid.org/0000-0002-5824-6287, e-mail: iternell17@ukr.net

²PhD (Engin.), Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, orcid.org/0000-0003-4200-4424, e-mail: irinan842@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.7>

One of the main problems of the modern world is the search for economy of energy resources that could compete with natural gas. High-temperature furnaces are one of the biggest consumers of fuel. The heat-technology installation (furnace unit) is a set of working space within which a high-temperature process is carried out, and the equipment that ensures its implementation.

The upper part of the reactor enclosure (working space) is called the vault. The vault is an element that determines the stability of the unit in general and affects the technical and economic indicators of production.

On furnaces with intensive blowing of the bath with oxygen, the stability of the vault is about 300 melts. In the course of the technological process, the furnace vault is affected by the following factors:

- uneven heating of the inner surface of the vault along the length and width due to the uneven temperature field of the torch when heating the unit;
- temperature fluctuations depending on technological periods;
- a change in the chemical and phase composition of the refractory vault material as a result of the influence of slag and metal splashes, smelting dust and the gas atmosphere of the working space of the furnace. The intensification of thermal and technological regimes contributes to strengthening and accelerating the action of the above-mentioned processes. Therefore, special attention should be paid to the issue of high-quality heating of the vault of the unit.

The article presents the results of studies of factors affecting the stability of the vault of high-temperature aggregates.

On the basis of calculations based on the heat balance equations of the high-temperature unit, as well as

recommendations for heating refractory products. In this article has been developed a new rational heating mode.

The new thermal mode of heating the vault of the furnace will ensure a uniform temperature gradient over the entire surface of the vault, as well as the space of the furnace: with exposure to 300°C and 800°C in the zones of increased linear expansion of directly bonded high-temperature products. And also increase the productivity of the unit due to faster entry into the working mode. The fuel reduction for the heating process is estimated about 10.7%.

References 8, tables 1, figures 2.

Keywords: thermal regime, heating, thermal balance, heat arrival, fuel.

1. Revun M.P., Cheprasov A.I. Matematychnye modelyuvannya nahrivu metalu v pechi [Mathematical modeling of metal heating in a furnace (message 2)] // Metalurhiya: naukovy pratsi ZDIA. - Zaporizhzhia: ZDIA, - 2011. - No. 23. - P. 163-171. (in Ukr.)

2. Gubinsky V.I. Metalurhiyni pechi [Metallurgical furnaces]: Navch. posibnyk. - Dnipro: NMetAU, 2006. - 85 p. (in Ukr.)

3. Sushinnya ta rozihriv pechey [Drying and heating of furnaces] [Electronic resource]; Ukraine, 2016. - Access mode: <https://studfile.net/preview/9329465/page:3> (in Rus.)

4. Sushchenko A.V. Porivnyal'nyy analiz metodyk rozrakhunku material'noho ta teplovoho balansiv kysnevo-konverternoyi plavky [Comparative analysis of methods for calculating material and heat balances of oxygen-converter smelting] // Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. naukovykh prats' / PDTU.- Mariupol, 2013. - Issue 27. - P. 17-29. (in Ukr.)

5. Tymchak V.M., Gusovsky V.L. Raschety nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey: spravochnik [Calculations of heating and thermal furnaces: reference book]. - M.: Metallurgy, 1983. - 481 p. (in Rus.)

6. Gubinsky V.I. Nahrival'ni pechi metalurhiyi – s'ohodni ta zavtra [Heating furnaces of metallurgy – today and tomorrow] // Teoriya i praktika metallurgii, - 2004. - No. 6. - P. 56-60. (in Ukr.)

7. Ryzhenkov A.N., Krykunov B.P., Petrov Yu.V. Patent of Ukraine, No. 20930. Sposob upravleniya teplovym rezhimom staleplavil'noy pechi [Method of controlling the thermal regime of a steel-melting furnace]. - Publ. 15.02.2007. Bul. No. 2. (in Rus.)

8. Tereshchenko M.O., Gorskyi A.M. Vohnetryvkykh materialiv promyslovist' [Refractory materials industry] // Encyclopedia of Modern Ukraine [Electronic resource]; Entsiklopediya Suchasnoyi Ukrayiny, National Academy of Sciences. - K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005. - Access mode: <https://esu.com.ua/article-35277> (in Ukr.)

Отримано 07.03.2023

Received 07.03.2023

УДК 628.16; 628.3

ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ (ТЕС)

Ободович О.М.¹, д.т.н., Сидоренко В.В.², к.т.н., Булій Ю.В.^{1,2}, к.т.н., Степанова О.Є.¹, к.т.н.

¹професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net

²с.н.с., старший дослідник, Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>, e-mail: vrangel08@i.ua

³пров.н.с., доцент, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська 68, Київ, 01601, Україна, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>, e-mail: yvbuliy@gmail.com

⁴с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.8>

Проведений аналіз стічних вод ТЕС, а також технологій і обладнання для їх очищення, та вибору раціонального режиму. Запропоновано нове енергоефективне обладнання, за допомогою якого можна очищати воду від цілого ряду шкідливих речовин до їх гранично допустимих концентрацій.

An analysis of TPP wastewater, as well as technologies and equipment for their treatment, and the selection of a rational regime was carried out. New energy-efficient equipment has been proposed, with the help of which it is possible to purify water from a number of harmful substances up to their maximum permissible concentrations.

Бібл. 11, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: водопідготовча установка, гранично допустима концентрація, дискретно-імпульсне введення енергії, стічні води, теплоелектростанція.

Q – кількість води, що охолоджує конденсатори турбін, т/год.;

W – потужність станції, МВт;

K – коефіцієнт;

АОРТ – аераційно-окислювальна установка роторного типу;

ВПУ – водопідготовча установка;

ГДК – гранично допустима концентрація;

ХВО – хімводоочищення;

ГЗУ – гідрозолоуловлювання;

ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії;

ТЕС – теплоелектростанція.

Вступ

Експлуатація теплових електростанцій пов'язана з використанням великої кількості води. Основна частина води (понад 90 %) витрачається в системах охолодження різних апаратів: конденсаторів турбін, масло- та повітроохолоджувачів, рухомих механізмів та ін. [1].

Стічною водою є будь-який потік води, що виводиться із циклу електростанції.

До стічних або скидних вод, крім вод систем охолодження, відносяться: скидні води систем гідрозолоуловлювання (ГЗУ), відпрацьовані розчини після хімічних промивань теплосилового обладнання або його консервації: регенераційні та шламові води від водопідготовчих (водоочисних) установок (ВПУ): нафтозабруднені стоки, розчини та суспензії, що виникають при обмиванні зовнішніх поверхонь нагріву, головним чином повітропідігрівачів і водяних економайзерів котлів, що спалюють сірчастий мазут.

Склади перелічених стоків різні і визначаються типом теплоелектростанцій (ТЕС) та основного обладнання, її потужністю, видом палива, складом вихідної води, способом водопідготовки в основному виробництві та, звичайно, рівнем експлуатації.

Води після охолодження конденсаторів турбін і охолоджувачів повітря несуть, як правило, тільки так зване теплове забруднення, оскільки їх температура на 8...10 °С перевищує температуру води у вододжерелі. У деяких випадках охолоджувальні води можуть вносити в природні водойми і сторонні речовини. Це зумовлено тим, що в систему охолодження включені також і маслоохолоджувачі, порушення щільності яких може призводити до проникнення нафтопродуктів (масел) в охолоджувальну воду. На мазутних ТЕС утворюються стічні води, що містять мазут.

Масла можуть потрапляти в стічні води також з головного корпусу, гаражів, відкритих розподільних пристроїв, маслогосподарств.

Кількість вод систем охолодження визначається в основному кількістю пари, що відпрацювала, яка надходить в конденсатори турбін. Отже, найбільше цих вод на конденсаційних ТЕС (КЕС) та АЕС, де кількість води (т/год.), що охолоджує конденсатори турбін, може бути знайдено за формулою $Q = KW$, де W – потужність станції, МВт; K – коефіцієнт: для ТЕС $K = 100 \dots 150$, для АЕС – $150 \dots 200$ [2].

Хімічний склад кожного з цих стоків різний і залежить від типу ТЕС, встановленого на станції обладнання, потужності ТЕС, початкового складу вихідної води, обраного способу водопідготовки, виду палива, що використовується, а також від рівня експлуатації.

Метою даної роботи є класифікація стічних вод ТЕС, аналіз існуючих технологій та обладнання для їх очищення, визначення гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин, що характерні для енергетики перед скиданням у водойми. Презентація нового енергоефективного обладнання для очищення стоків.

Стічні води систем охолодження

Стічні води систем охолодження – це води, які використовуються в конденсаторах турбін і в іншому теплообмінному устаткуванні, де вони тільки нагріваються, не піддаючись при цьому механічному або хімічному забрудненню. Однак теплове забруднення становить особливу небезпеку для водойм та їх мешканців. У зв'язку з цим скидання нагрітої на електростанції води повинно здійснюватися відповідно до нормативних документів, яке дозволяється лише в тому випадку, якщо середньомісячна температура води після скидання в створі водойми влітку не перевищить природну на $3 \dots 5$ °С.

Як засоби зниження температури стічних вод систем охолодження найбільш широке застосування отримали ставки-охолоджувачі, бризкальні басейни та градірні різних конструкцій.

Стічні води систем ГЗУ

Утворені при спалюванні палива шлаки та уловлена зола видаляються на золовідвали системою гідрозолоуловлювання. Найбільш широко поширені оборотні системи ГЗУ, які мають продування з метою підтримки сольового балансу та, як наслідок, мінімізації утворення відкладень.

Води продування системи ГЗУ вважаються одними з найтоксичніших стоків, тому оборотні системи всіх ТЕС (плановані, що будуються та реконструюються) мають бути спроектовані безстічними. Найбільш широко для зменшення шкідливого впливу продувних вод використовується вапно. У процесі обробки утво-

рюються малорозчинні сполуки, які містять миш'як, фтор, хром, що випадають в осад. Однак застосування лише одного ступеня очищення – вапна, що не завжди може очистити воду до потрібних показників ГДК. Тому для більш глибокого ступеня очищення додатково вводяться інші реагенти (солі заліза, магнію, алюмінію та ін.) або ж проводиться доочищення за допомогою сорбційних методів [3].

Регенераційні води від водопідготовчих установок

Підготовка води на ВПУ проходить у два етапи: початкове очищення та повне знесолення. Тому стічні води, утворені в процесі роботи ВПУ, поділяються на два потоки:

- 1) води, що отримані при коагуляції та вапнуванні, в яких знаходиться велика кількість завислих речовин;
- 2) води підвищеної мінералізації.

Стічні води після першого ступеня очищення мають у своєму складі органіку, солі алюмінію та заліза, а також карбонат кальцію, гідроксид магнію та неспрацьований реагент. Для ефективної утилізації стічних вод від системи водопідготовки на ТЕС споруджують шламоушільнювальні станції, в яких отриманий шлам зневоднюється, а виділена в окрему фракцію вода повертається в цикл. Води з підвищеним вмістом солей (мінералізацією) відправляють у систему ГЗУ для видалення золи та шлаку, або на пом'якшення з подальшим поверненням на ВПУ, або на випарювання.

У майбутньому ефективним методом зменшення витрати необхідних реагентів та мінімізації стічних вод, які утворюються в процесі підготовки води виняткової якості, може стати заміна традиційного прямого на протиточне знесолення. Однак застосування найкращих і досконалих іонообмінних систем не виключає утворення стічних вод. У зв'язку з цим ведуться численні розробки щодо вдосконалення різних методів обробки та утилізації стічних вод.

Світовий досвід показує, що досягти повної утилізації стічних вод зараз можливо лише з використанням випарників із виділенням солей у твердому вигляді.

Стічні води, забруднені нафтопродуктами

Забруднення води нафтопродуктами на ТЕС відбувається у процесах: експлуатації та ремонту різного обладнання мазутного господарства; витоків з маслосистем турбін, електричних генераторів та збудників; аварійного розливу мазуту та масла; витоків із систем охолодження підшипників насосів, димососів, вентиляторів та ін., а також від гаражів та місць миття автотранспорту.

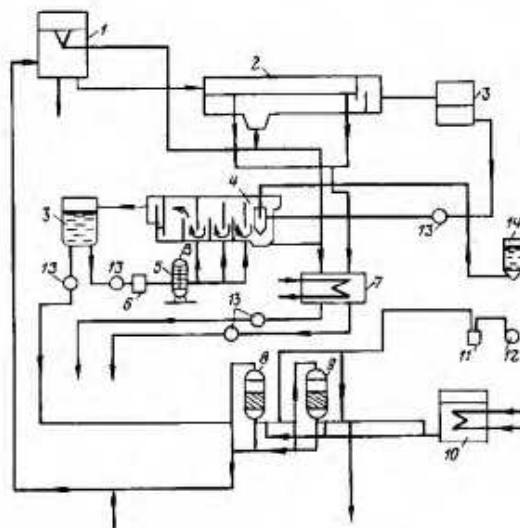


Рис. 1. Технологічна схема з очищення стічних вод, які містять нафтопродукти: 1 – бак-приймач; 2 – нафтовик; 3 – проміжні баки; 4 – флотатор; 5 – напірна ємність; 6 – ежектор; 7 – бак прийому мазуту; 8 – механічний фільтр; 9 – фільтр, завантажений вугіллям; 10 – бак промивної води; 11 – ресивер; 12 – компресор; 13 – насоси; 14 – розчин коагулянту

Очищення нафтозабруднених вод є винятково важливим завданням через вплив нафтопродуктів на довкілля. Тому методи очищення цих вод завжди піддаються модернізації. Так, на сучасних ТЕС, окрім використання консервативних систем (рис. 1), що складаються з нафтовиків, механічних фільтрів і фільтрів, завантажених активованим вугіллям, також отримали застосування альтернативні фільтри [4].

Одним з таких способів модернізації системи очищення стічних вод є застосування шламу ХВО на останньому ступені очищення, що дозволяє знизити витрати на очищення стічних вод. При цьому шлам у цій схемі регенерації не піддаватимуть, а спільно спалюватимуть з допоміжним паливом, що значно спрощує утилізацію.

Обмивальні води

При спалюванні на електростанціях різного типу палива: мазутів та твердого палива, золи різноманітного складу, що осідає в системі регенеративних повітропідігрівачів та на стінках газоходу. Обмивальні води цих поверхонь після використання мають відносно високу кислотність і вміст токсичних речовин перебуває вище за норму (V, Ni, Cu та ін.). Найчастіше для нейтралізації та знешкодження обмивальних вод використовується метод двостадійної нейтралізації: на першій стадії проводиться обробка їдким натром, до значення $pH = 4,5 \dots 5$, а на другій –

вапном ($pH = 9,5 \dots 10$) (рис. 2). Очищена таким чином вода повторно використовується для відмивання.

Стічні води хімічних промивань та консервації обладнання

Вибір виду технології проведення промивки і хімічний склад необхідних реагентів виключно залежить від відкладень (склад, вид), які піддаються видаленню, а також від типу устаткування, що очищається. Хімпромивка обладнання проводиться в кілька етапів: попереднє промивання водою, знежирення лугом, промивання необхідним розчином і проведення в кінці пасивації.

Для хімічного промивання застосовуються реагенти різного складу: інгібована соляна кислота, сірчана кислота з гідратином, комплексопи та ін., при цьому для промивань заборонено застосування реагентів, норма ГДК для яких не встановлена, а також які не можуть бути знешкоджені.

З метою зниження обсягу таких стічних вод доцільним є передбачене використання консервації, що ґрунтується на сухих способах, обробки теплообмінних поверхонь комплексонами, регенерації дорогих хімічних розчинів, що використовуються для промивання, та консервації обладнання контактними інгібіторами корозії. При цьому найкращим способом зниження кількості промивань є забезпечення ТЕС водою підживлення виняткової якості.

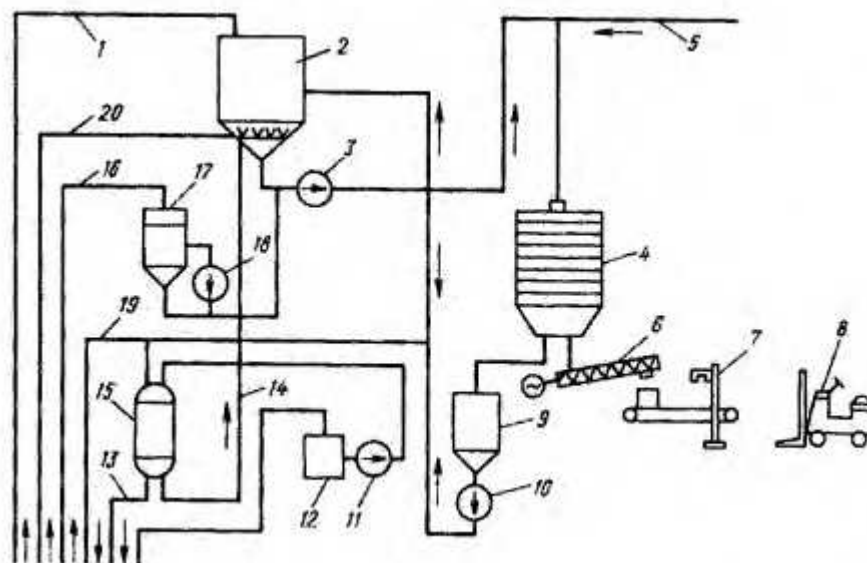


Рис. 2. Схема установки знешкодження та нейтралізації обмивальних вод:
 1 – обмивальна вода; 2 – бак-нейтралізатор; 3 – насос; 4 – фільтр-прес; 5 – технічна промивна вода; 6 – шнековий транспортер; 7 – машина для зашивання мішків;
 8 – навантажувач; 9 – бак-збірник; 10 – насос фільтрату; 11 – насос розчину солі;
 12 – бак-мірник розчину солі; 13 – фільтрат; 14 – регенераційний розчин;
 15 – катіонітний фільтр; 16 – вапняне молоко; 17 – мішалка; 18 – насос;
 19 – освітлена вода; 20 – стиснене повітря

Для зниження негативного впливу промивних вод проводиться виділення та подальше окислення токсичних речовин. Після відокремлення шламів очищена вода використовується повторно для промивання обладнання [5].

Поверхневі зливові та талі води

Вид та склад забруднювачів поверхневого стоку електростанції залежить від погодних умов (інтенсивність та тривалість дощів, обсяги снігу, що випав, та тип його збирання), а також озеленення та благоустрою території. До основних забруднювачів цього типу стічних вод можна віднести нафтопродукти і зважені речовини.

Тому для кожної ТЕС розроблено власні алгоритми розрахунку обсягу поверхневих вод, які перебувають у прямій залежності від області знаходження станції та площі, яку вона займає. У процесі розрахунків до даних стічних вод додають ливнівки (води від поливомийних заходів, мийки дорожніх покриттів).

З метою скорочення рівня забруднення ґрунтів та підземних вод на теплових електричних станціях сконструйовано локальні споруди з очищення стічних

вод. Другим методом є збір стічних вод у спеціально створені ємності з подальшим очищенням на відстійниках і фільтрах, які як фільтруючий матеріал мають антрацит або активоване вугілля.

Незабруднені дощові та талі води можуть застосовуватися для власних потреб: підживлення оборотних систем водопостачання, водопідготовки тощо.

Очищені стічні води ТЕС, які не використовуються для відповідних потреб, скидаються у водоймища санітарно-побутового або рибогосподарського водовикористання. В таблиці 1 представлені гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у водоймах, що характерні для енергетики.

Гранично допустимою концентрацією (ГДК) шкідливої речовини у воді водоймища називається її концентрація, яка при щоденному впливі протягом тривалого часу на організм людини не викликає будь-яких патологічних змін та захворювань, що виявляються сучасними методами досліджень, а також не порушує біологічного оптимуму у водоймі.

Стічні води ТЕС різноманітні і хімічний склад кожного із стоків різний. Технологія очистки стоків складна і багатоетапна та потребує великої кількості різноманітного обладнання.

Табл. 1. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у водоймах

Речовина	Для водойм санітарно-побутового водокористування	Для рибогосподарських водойм
	ГДК, мг/дм ³	ГДК, мг/дм ³
Аміак NH ₃	2,0	0,05
Ванадій V ⁵⁺	0,1	0,001
Гідразин N ₂ H ₄	0,01	-
Залізо Fe ²⁺	0,3	0,005
Мідь Cu ²⁺	1,0	0,001
Миш'як As ²⁺	0,05	0,05
Нікель Ni ²⁺	0,1	0,01
Нітрати (NO ₂ ⁻)	3,3	0,08
Поліакриламід	2,0	0,8
Ртуть	0,0005	відсутність
Свинець Pb ²⁺	0,03	0,1
Формальдегід	0,05	-
Фтор F ⁻	1,5	0,05
Сульфати (SO ₄)	500	100
Феноли	0,001	0,001
Нафта та нафтопродукти	0,3	0,05



Рис. 3. Аераційно-окиснювальна установка роторного типу (АОРТ):

1 – збірник-накопичувач; 2 – аератор-окиснювач; 3 – фільтраційно-окиснювальна колона;
 4 – розпилювальна головка; 5 – лічильник води; 6 – манометр; 7 – вакуумметр;
 8 – кран подачі повітря; 9 – двоходовий кран



Рис. 4. Дослідно-промислове обладнання: 1 – аераційно-окиснювальна установка; 2 – блок пуску та управління; 3 – проміжна ємність подачі води на фільтр; 4 – фільтр; 5 – збірник готової продукції

В ІТТФ НАНУ розроблено багатоцільову аераційно-окислювальну установку роторного типу (АОРТ) (рис. 3, 4), яка працює за методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [6, 7]. Ця установка дозволяє пришвидшити швидкість тепломасообміну хімічних реакцій у воді та водних системах на 25-30 %. Вона дає можливість скоротити тривалість процесів очищення, у 2-3 рази зменшити енерговитрати та витрату реагентів на 20-25 %. Установку АОРТ застосовують для очищення стоків від заліза, марганцю, сірководню, діоксидвуглецю, сульфатів, нітратів. З її допомогою можна підвищити рН води [8-11].

Установка АОРТ дозволяє інтенсифікувати процеси перемішування, розчинення, нагрівання, диспергування, аерації та дегазації. Ці ефекти досягаються за рахунок того, що установка АОРТ працює на основі методу ДІВЕ. Реалізація методу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених в дисперсному середовищі робочих органів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі і просторі. Супроводжуючі ці явища ударні хвилі, міжфазна турбулентність, мікрокавітація, протікаючи кумулятивні мікрострумені та вихори викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного подрібнення дисперсних включень, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесів тепломасопереносу.

Подібні ефекти зазвичай недосяжні при використанні традиційних методів при обробці води і водних систем, навіть при значно більшому рівні питомих енерговитрат.

Висновки

Очищення стічних вод ТЕС є важливим та необхідним фактором. Вибір раціонального режиму очищення залежить від хімічного складу стоків, який в свою чергу залежить від типу ТЕС, встановленого обладнання, потужності ТЕС, початкового складу вихідної води, обраного способу водопідготовки та рівня експлуатації.

У роботі представлена класифікація стічних вод ТЕС, а також технологія і обладнання для їх очищення. Вказані гранично допустимі концентрації шкідливих речовин, характерних для енергетики в стічних водах. Запропоновано нове енергоефективне обладнання, за допомогою якого можна очищати воду від цілого ряду шкідливих речовин до їх гранично допустимих концентрацій та нижче.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Копылов А.С., Лавыгин М.В., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.
2. Сточные воды ТЭС и их очистка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allbest.ru/>.

3. *Лаптев А.Г.* Энерго- и ресурсосберегающие технологии и аппараты очистки гидкостей в нефтехимии и энергетике / А.Г. Лаптев и др. – Казань: Отечество, 2010. – 410 с.
4. *Bi-tes – очистные сооружения* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bi-tes.ru/>.
5. *Беспалов В.И., Беспалова С.У., Вагнер М.А.* Природоохранные технологии на ТЭС: учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – 240 с.
6. “Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ”: Тематический сборник статей / под. общей ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К.: Академперіодика, 2015. – 464 с.
7. *Долинский А.А., Ободович А.Н., Бархаленко Ю.А.* Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация: Монография.: Віровець А.П. “Апостроф”, 2012. – 185 с.
8. *Патент UA 114143.* Установка для аераційного знезалізнення води. 27.02.2017, Бюл. № 4.
9. *Патент UA 102393.* Спосіб аерації. 26.10.2015, Бюл. № 20.
10. *Патент UA 114382.* Спосіб окислювально-каталітичного очищення пластових і стічних вод. 25.05.2017, Бюл. № 10.
11. *Патент UA 119083.* Спосіб біологічного очищення стічних вод. 25.04.2019, Бюл. № 8.

WASTEWATER TREATMENT OF THERMAL POWER PLANTS (TPP)

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

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

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

³PhD (Engin.), Assistant, National University of Food Technologies, Volodymyrska str., 68, Kyiv, 01601, Ukraine, orcid.org/0000-0002-1905-3706, e-mail: yvbuliy@gmail.com

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.8>

An analysis of TPP wastewater, as well as technologies and equipment for their treatment, for choosing a rational mode and determining the maximum permissible concentrations of harmful substances characteristic of the energy industry before discharge into reservoirs was carried out. The compositions of the listed effluents are different and are determined by the type of thermal power plants (TPP) and the main equipment, its capacity, type of fuel, composition of the source water, method of water treatment, etc. For example, water after cooling turbine condensers and air coolers usually carries so-called thermal pollution, since its temperature is 8...10 °C higher than the temperature of water in the water source. In some cases, cooling water can introduce foreign substances into natural reservoirs. In order to reduce the level of soil and groundwater pollution, local wastewater treatment facilities were constructed at thermal power stations. The second method is the collection of waste water in specially created containers with subsequent purification using sedimentation tanks and filters, which have anthracite or activated carbon as a filter material.

TPP waste water is diverse and the chemical composition of each of the effluents is different. Wastewater treatment technology is complex and multi-stage and requires a large amount of various equipment.

The ITTF of the National Academy of Sciences has developed a multi-purpose rotor-type aeration and oxidation plant (AORT), which works according to the method of discrete-pulse energy input (DPEI). This installation makes it possible to speed up the rate of heat and mass exchange of chemical reactions in water and water systems by 25-30 %. It makes it possible to reduce the duration of cleaning processes, reduce energy consumption by 2-3 times and consumption of reagents by 20-25 %. The AORT installation is used to clean sewage from iron, manganese, hydrogen sulfide, carbon dioxide, sulfates, and nitrates.

References 11, figures 4, tables 1.

Keywords: water treatment plants, maximum permissible concentration, discrete-pulse input of energy, waste water, thermal power plant.

1. Kopylov A.S., Lavyhin M.V., Ochkov V.F. [Water treatment in the energy sector]: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. – 2-ye izd., stereot. – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2006. 309 p. (Rus.)

2. [Wastewater from thermal power plants and their treatment] [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.allbest.ru/>. (Rus.)

3. Laptev A.G. [Energy- and resource-saving technologies and devices for cleaning liquids in petrochemistry and energy] / A.G. Laptev i dr. – Kazan: Otechestvo, 2010. 410 p. (Rus.)

4. [Bi-tec – ochistnyye sooruzheniya] [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.bi-tec.ru/>. (Rus.)

5. Bepalov V.I., Bepalova S.U., Vagner M.A. [Environmental technologies at thermal power plants]: Uchebnoye posobiye. – Tomsk: TPU, 2010. 240 p. (Rus.)

6. Dolinsky A.A. [Mikro- i nanourovnevnyye protsessy v tekhnologiyakh DIVE]: Tematicheskii sbornik statey / pod. obshchey red. A.A. Dolinskogo; Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv: Akademperiodika, 2015. 464 p. (Rus.)

7. Dolinsky A.A., Obodovych O.M., Barkhalenkov YU.A. [Discrete-pulse energy input method and its implementation]: Monografiya.: Virovets' A.P. "Apostrof", 2012. 185 p. (Rus.)

8. [Installation for aeration water cooling] Patent UA No. 114143; published 27.02.2017. № 4. (Ukr.)

9. [Method of aeration] Patent UA No. 102393; published 26.10.2015. № 20. (Ukr.)

10. [Method of oxidative-catalytic treatment of formation and wastewater] Patent UA No. 114382; published 25.05.2017. № 10. (Ukr.)

11. [A method of biological wastewater treatment] Patent UA No. 119083; published 25.04.2019. № 8. (Ukr.)

Отримано 20.03.2023

Received 20.03.2023

УДК 620.92

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ БІОМАСИ УКРАЇНИ

Гелету́ха Г.Г., докт. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Кучерук П.П., 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.2.2023.9>

Виконано комплексну оцінку поточного та перспективного потенціалу біомаси в Україні, доступного для енергетичних потреб. Розроблено сценарій довгострокового використання цього потенціалу для виробництва енергії та біопалив з урахуванням аспектів сталості.

A comprehensive assessment of the current and prospective potential of Ukraine's biomass available for energy has been performed. A long-term scenario of using this potential for the production of energy and biomass fuels has been developed, taking into account sustainability issues.

Бібл. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: біомаса, потенціал біомаси, поживні рештки, біопаливо, біогаз, біометан.

АПК – агропромисловий комплекс;

ВХО – використана харчова олія;

ТПВ – тверді побутові відходи;

н.е. – нафтовий еквівалент;

орг. – органічний;

с/г – сільське господарство.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю скорочення споживання викопних палив в Україні, зокрема, за рахунок більш широкого використання біомаси. **Метою** роботи є всебічна оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні та розробка рекомендацій для практичної реалізації перспективних напрямків його використання. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Комплексна оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні

Наявність значного потенціалу біомаси, доступного для виробництва різних видів біопалива та енергії, є однією з основних передумов успішного розвитку біоенергетики України. Результати оцінки, виконаної за даними 2021 р., показують, що енергетичний потенціал біомаси в Україні становить близько 26 млн т н.е./рік (табл. 1). Комплексна оцінка потенціалу проведена за такими складовими як тверда біомаса, рідке біопаливо і біогаз. Джерелами твердої біомаси є різноманітні сільськогосподарські залишки (загалом 10,8 млн т н.е./рік), різні види деревної біомаси (2,7 млн т н.е./рік) та енергетичні рослини (2,6 млн т н.е./рік за умови їх вирощування на 0,5 га незадіяних сільськогосподарських земель). Тверда біомаса кількістю понад 16 млн т н.е./рік є найбільшою складовою енергетичного потенціалу біомаси країни – 62% загального обсягу.

Оцінка потенціалу виробництва рідкого біопалива включає біодизель з насіння ріпаку як сільськогосподарської культури (взято 70% загального врожаю) і з олійних енергетичних рослин (передбачено вирощування на 0,5 млн га), а також біоетанол з зерна кукурудзи (взято 10% врожаю). У 2021 році більше 90% насіння ріпаку було експортовано з України, головним чином в країни ЄС. При цьому, в Євросоюзі майже 70% насіння ріпаку (виробленого та імпортованого) іде на отримання біодизелю [3, 4]. Орієнтуючись на розвиток власного виробництва біопалив, а не на експорт сировини, вважаємо, що 70% врожаю ріпаку може бути використано для отримання біодизелю в Україні.

Аналіз та співставлення даних щодо світових обсягів виробництва і переробки кукурудзи [5], а також виробництва біоетанолу з різних видів сировини [6, 7] показує, що у 2021 р. близько 13% врожаю зерна кукурудзи у світі було використано для отримання біоетанолу. Ґрунтуючись на цьому, для України в оцінці потенціалу біомаси вважаємо за доцільне прийняти, що 10% врожаю зерна кукурудзи може перероблятися на біоетанол. За прийнятим підходом, очікуваний обсяг отримання біодизелю з ріпаку та з олійних енергетичних рослин оцінюється у 0,88 млн т н.е./рік, а біоетанолу з кукурудзи – 0,86 млн т н.е./рік.

Табл. 1. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні (2021 р.)¹⁾

Вид біомаси / біопалива	Теоретичний потенціал виробництва	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е./рік
ТВЕРДА БІОМАСА:	млн т/рік		
Сільськогосподарські залишки:	136,56	33	10,80
солома зернових	42,01	20	2,87
солома ріпаку	5,88	40	0,80
побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	54,74	40	4,18
побічні продукти виробництва соняшника (стебла, корзинки)	31,15	40	1,79
лушпиння соняшника	2,78	100	1,16
Деревна біомаса:	16,04	67	2,70
паливна деревина, порубкові рештки, відходи деревообробки	7,20	95	1,68
сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи обрізки і викорчовування багаторічних с/г насаджень	8,84	44	1,02
Енергетичні рослини (верба, тополя, міскантус на 0,5 млн га)	6,00	100	2,58
Тверда біомаса, всього	158,60	46	16,08
РІДКЕ БІОПАЛИВО:	млн л/рік		
Біодизель:	1412	78	0,88
з с/г ріпаку (70% врожаю насіння)	1052	70	0,58
передовий біодизель з олійних енергорослин на незадіяних с/г землях (0,5 млн га) ²⁾	360	100	0,29
Біоетанол з с/г кукурудзи (10% врожаю зерна)	16844	10	0,86
Рідке біопаливо, всього	18256	15	1,73
БІОГАЗ:	млрд м ³ CH ₄ /рік		
Біогаз з відходів тваринницьких підприємств, у т.ч.:	1,04	80	0,71
з гною великої рогатої худоби	0,29	49	0,12
з гною свиней	0,27	93	0,22
з посліду птахів	0,47	93	0,38
з гною малої рогатої худоби	0,010	25	0,002
Біогаз з пожнивних решток с/г культур, у т.ч.:	16,79	26	3,80
з соломи колосових (пшениця, жито, ячмінь)	7,05	20	1,21
зі стебел кукурудзи	6,67	30	1,72
зі стебел та кошиків соняшнику	1,44	27	0,33
з соломи сої	0,60	30	0,15
з соломи ріпаку	0,78	30	0,20
з ботвини цукрових буряків	0,24	90	0,18
Біогаз з побічної продукції харчової переробної промисловості, у т.ч.:	1,69	39	0,56

з побічних продуктів олійної промисловості	1,13	28	0,27
з побічних продуктів молочної промисловості	0,01	75	0,01
з побічних продуктів борошномельно-круп'яної промисловості	0,09	50	0,04
з побічних продуктів пивної промисловості	0,03	50	0,01
з побічних продуктів спиртової промисловості	0,05	75	0,03
з побічних продуктів цукрової промисловості	0,37	62	0,20
Біогаз з твердих побутових відходів	0,70	75	0,45
Біогаз з осадів стічних вод (комунальні очисні споруди)	0,07	100	0,06
Біогаз з силосу кукурудзи як енергетичної рослини (з 1 млн га)	3,00	100	2,57
Біогаз, всього	23,28	41	8,16
ЗАГАЛОМ			25,97

1) Без урахування тимчасово окупованих територій України станом на 2021 рік.

2) В даній оцінці біодизель цього виду вважається передовим, оскільки згідно Директиви ЄС з відновлюваної енергетики RED II [1] він не підпадає під обмеження щодо рідких біопалив, вироблених з харчових/кормових культур [2].

У виконаній оцінці потенціалу виробництва біометану враховано шість окремих груп сировини, що походять з галузей промислового тваринництва, промислового рослинництва, харчової переробної промисловості, а також комунального господарства. Види вхідної сировини охоплюють як потоки відходів та побічних продуктів, що генеруються різними галузями при поточній потужності виробництв, так і енергетичні рослини (наприклад, силос кукурудзи), які потенційно можуть бути вирощені на площі в 1 млн га.

Сумарний річний потенціал виробництва біометану в секторі АПК з відходів, побічних продуктів та спеціально вирощених енергетичних рослин складає 7,65 млн т н.е. Найбільша частка цього потенціалу припадає на поживні рештки основних сільськогосподарських культур (46,6%) та силос кукурудзи (31,5%). Відходи тваринництва можуть дати лише 0,71 млн т н.е., що становить 8,7% загального потенціалу в секторі АПК. Таким чином, суттєве нарощування виробництва біометану можливе, переважно, за рахунок залучення поживних решток та енергетичних рослин. При цьому, енергетичні рослини прийнято вважати, принаймні в ЄС, конкуруючими з продуктами харчування та кормами, а відтак перспективи їх суттєвого залучення для виробництва біометану в майбутньому наразі є не очевидними. Разом з тим, позиція авторів полягає в тому, що Україна ще має достатній потенціал залучення земель для вирощування енергетичних рослин без значного впливу на харчову безпеку, як національну, так і світову.

Результати оцінки показують, що найбільш вагомими складовими загального енергетичного потенціалу

біомаси України є сільськогосподарські залишки (42% загального обсягу), біогаз з поживних решток сільськогосподарських культур (15%), біогаз з силосу кукурудзи (10%), деревна біомаса (10%) і енергетичні рослини на тверде біопаливо (10%) (рис. 1).

В оцінці потенціалу поживних решток, що можуть бути використані для виробництва енергії та біопалив враховано доступність сировини для організованого збору технічними засобами, а також альтернативні напрямки споживання поживних решток, у тому числі на власні потреби сільського господарства. Згідно вибраного підходу, на полі в якості органічного добрива залишається 30-40% загального обсягу соломи різних культур. Крім того, практично вся маса макро- та мікроелементів, зокрема комплекс NPK в доступній для рослин формі, та до 50% маси органічного вуглецю, вилучених з поля з поживними рештками, може повернутись на ті ж поля з дигестатом, утвореним в процесі анаеробного зброджування в біогазових установках. Такий підхід дозволяє забезпечувати повернення в органічний цикл рослинництва разом з поживними рештками та дигестатом з них загалом 44-49% органічного вуглецю та 60% NPK (табл. 2). Для ботвини цукрових буряків ці показники становлять 51% та 100%, відповідно. Для інших напрямків неенергетичного використання соломи зернових колосових культур (підстилка та грубий корм для худоби, субстрат для вирощування грибів, сировина для виробництва паперу та ін.) передбачено 20% загаль-



Рис. 1. Структура енергетичного потенціалу біомаси в Україні, млн т н.е. (2021 р.)

ного обсягу утворення цього виду біомаси.

Фактори росту енергетичного потенціалу біомаси України до 2050 року

Експертні оцінки свідчать про можливість значного збільшення енергетичного потенціалу біомаси в Україні у період до 2050 р. Основні фактори росту потенціалу включають:

- Підвищення врожайності сільськогосподарських культур, в першу чергу, зернових. Аналіз поточного стану та існуючих тенденцій у сільському господарстві України, а також даних щодо врожайності зернових культур в Україні та країнах ЄС показує, що, зокрема, врожайність пшениці в Україні до 2050 року може зрости у 1,2 рази, а кукурудзи – у 1,25 разів.

- Збільшення площ під енергетичними рослинами та ріст їх врожайності. Очікується, що площі під енергорослинами у 2050 році складуть 1 млн га для

деревоподібних і трав'янистих культур (верба, тополя, міскантус), 1 млн га для олійних культур на біодизель і ще 1 млн га для кукурудзи на біогаз. Ріст врожайності можливий у 1,5 разів для деревоподібних/трав'янистих культур і 1,25 разів – для кукурудзи на біогаз.

- Використання 20% ріллі під вирощування покривних культур для виробництва біогазу, що відповідає підходам оцінки роботи [8]. Ці культури вирощують у міжсезонні між основними посівами, і таким чином вони забезпечують покрив ґрунту, захищаючи його від ерозії, покращуючи його якість та надаючи інші екологічні переваги. Дигестат, отриманий від зброджування біомаси покривних культур у біогазових установках, використовується як органічне добриво, що сприяє поверненню поживних речовин у ґрунт та відповідає підходам циркулярної економіки.

- Використання 10% потенціалу деревної біомаси для отримання біогазу шляхом термічної газифікації.

Табл. 2. Можливі напрямки використання поживних решток, %.

Вид біомаси	Енергетика			Інше ¹⁾	Покращення якості ґрунту				
					Залишається на полі ²⁾	Повертається на поле з дигестатом		Всього	
	Виробництво енергії/твердих біопалив	Зброджування (біогаз)	Всього			За С орг.	За NPK	За С орг.	За NPK
	I	II	III (I+II)	IV	V	VI	VII	VIII (V+VI)	IX (V+VII)
Солома зернових колосових	20	20	40	20	40	9	20	49	60
Стебла, стрижні кукурудзи	40	30	70	0	30	14	30	44	60
Стебла, кошики соняшнику	40	27	67	0	33	12	27	45	60
Солома сої	40	30	70	0	30	14	30	44	60
Солома ріпаку	40	30	70	0	30	14	30	44	60
Ботвина цукрових буряків	0	90	90	0	10	41	90	51	100

1) Корм/підстилка для худоби, вирощування грибів, виробництво паперу та інше.

2) Сума складових III (енергетика), IV (інше) і V (залишається на полі) дорівнює 100%.

Видається доцільним розширити сировинну базу виробництва біогазу за рахунок деревної біомаси. Застосування технології метанації очищеного генераторного газу дає можливість отримати біометан [9].

- Ріст обсягу рубки деревини в лісах. Аналіз поточного стану та існуючих тенденцій у лісовому господарстві України, а також даних щодо рівня рубки річного приросту деревини в країнах ЄС показує, що цей показник в Україні може бути збільшений в 1,4 рази (з близько 50% до 70%) [10, 11].

- Залучення нових видів сировини для виробництва моторних біопалив. При прогнозуванні потенціалу рідких біопалив у 2050 році враховується виробництво передового біоетанолу з лігноцелюлозної сировини, а також залучення нових видів сировини (наприклад, використаної харчової олії) для отримання передового біодизелю. При цьому треба зазначити, що потенціал сировини для виробництва біоетанолу I покоління у 2050р. обмежений 5% врожаю зерна кукурудзи (проти 10% у потенціалі 2021 р.). Скорочення потенційних

обсягів біоетанолу I покоління в Україні враховує існуючу загальноєвропейську тенденцію по обмеженню споживання рідких біопалив з харчових/кормових культур і заохоченню виробництва передових моторних біопалив.

Беручи до уваги наведені вище фактори, енергетичний потенціал біомаси України у 2050 р. оцінюється у близько 44 млн т н.е./рік, що у 1,7 рази більше потенціалу 2021 р. Структура потенціалу біомаси у 2050 р. характеризується значною часткою біогазу (42%), що є співставною із внеском твердої біомаси (52%) (рис. 2).

Прогноз використання енергетичного потенціалу біомаси України до 2050 року

Розроблено базовий сценарій використання енергетичного потенціалу біомаси України до 2050 року з урахуванням європейських тенденцій у секторі біоенергетики, а також особливостей умов України. Прогнозування ґрунтується на основних підходах та припущеннях, використаних у Дорожній карті розвитку біоенергетики України до 2050 року [12].

Згідно запропонованого сценарію, річний обсяг виробництва рідких біопалив у 2050 р. може досягти 2530 тис. т н.е. (у тому числі передового біодизелю/біоетанолу – 56%), а біометану – 14000 тис. т н.е. (у тому числі біометану на експорт – 50%) (рис. 3, 4). При цьому структура енергетичного використання твердої біомаси принципово відповідає такій, що представлена в роботі [12]. Реалізація даного сценарію передбачає подолання, принаймні, основних бар'єрів, існуючих у біоенергетичному секторі України. Серед них, в першу чергу, треба зазначити наступні:

- Відсутність затверджених довгострокових цілей з розвитку сектору біоенергетики.

- Відсутність конкурентного ринку теплової енергії в централізованому теплопостачанні.

- Відсутність аукціонів з державної підтримки проєктів з виробництва електроенергії з відновлюваних джерел.

- Невизначена державна позиція щодо енергетичного використання сільськогосподарських залишків.

- Відсутність вимоги щодо обов'язкової частки біоетанолу у бензині та біодизелю у дизельному паливі.

- Неготовність реєстру біометану.

- Відсутність базового закону щодо виробництва та споживання біометану на транспорті.



Рис. 2. Прогноз структури енергетичного потенціалу біомаси України у 2050 р., млн т н.е.



Рис. 3. Прогноз виробництва рідких біопалив в Україні до 2050 р., млн т н.е.

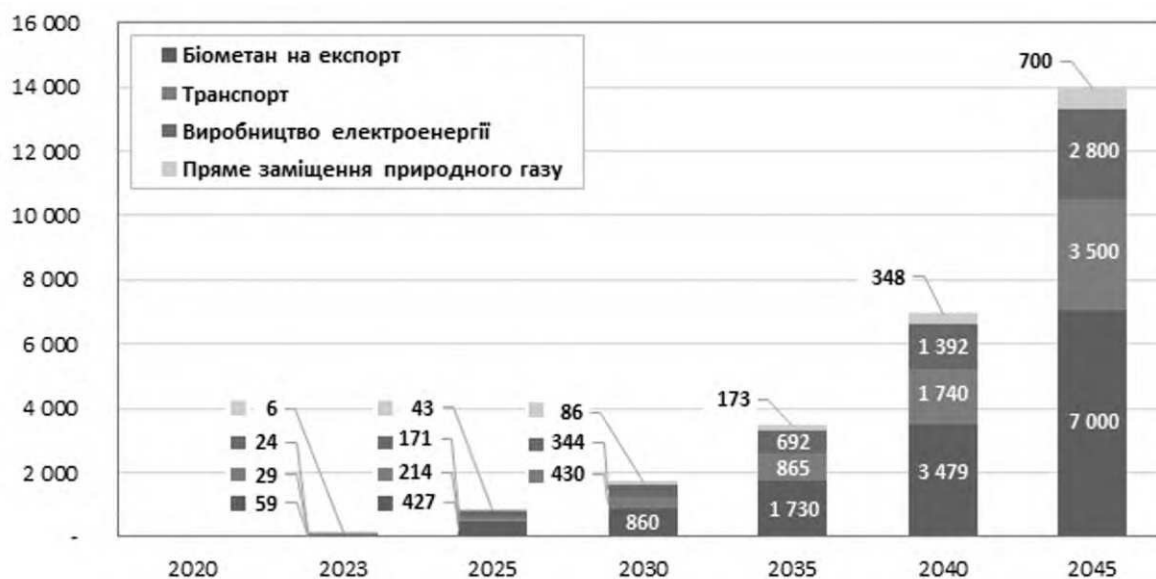


Рис. 4. Прогноз виробництва біометану в Україні до 2050 р., тис. т н.е.

Висновки та рекомендації для України

Україна має значний потенціал біомаси та інші важливі передумови для успішного розвитку біоенергетики. Для сприяння реалізації цього процесу необхідно подолати низку існуючих бар'єрів, у першу чергу, основних, що були зазначені вище. Також вважаємо за необхідне тимчасово послабити для України жорсткі критерії сталості, встановлені Директивою ЄС з відновлюваної енергетики RED II. Ці послаблення мають включати відтермінування вимоги щодо скорочення викидів парникових газів (65% для установок з виробництва рідких біопалив та біогазу для транспорту, що почали роботу з 01.01.2021); встановлення для України окремого обмеження до 2030 року по використанню енергії на транспорті з біопалив першого покоління (до 7%); розширення для України списку сировини для виробництва передових моторних біопалив, у тому числі врегулювання можливості вирощування сировини для отримання рідкого біопалива на забруднених, невикористовуваних, малопродуктивних та деградованих землях.

Стаття підготовлена в рамках виконання бюджетної теми Інституту технічної теплофізики НАН України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast), 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

2. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В. Аналіз перспектив та питань сталості виробництва рідких моторних біопалив в ЄС та в Україні // Теплофізика та теплоенергетика, – 2023, т. 45, № 1, с. 46-54. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.6>

3. Report on Oilseeds and Products Annual. USDA report E42022-0031, April 21, 2022. <https://bit.ly/3IEjGNV>

4. Report on Biofuels Annual. USDA report E42022-0048, July 13, 2022. <https://bit.ly/3JC18pq>

5. World Agricultural Supply and Demand Estimates. USDA, 2023.

6. Annual Ethanol Production. Renewable Fuels Association. <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0323.pdf>

7. Annual Ethanol Production. Renewable Fuels Association.

8. <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>

9. OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031. Biofuels. <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>

10. S. Alberici, W. Grimme, G. Toop. Biomethane production potentials in the EU. Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050. A Gas for Climate report, 2022. https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/10/Guidehouse_GfC_report_design_final_v3.pdf

11. H. Li, D. Mehmooda, E. Thorina, Z. Yub. Biomethane production via anaerobic digestion and biomass gasification // Energy Procedia. – 2017, v. 105, p. 1172-1177. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.490>

10. *J. Geelen*. Statistical Report on Biomass Supply. Bioenergy Europe, 2022, 56 p.

11. Гелету́ха Г.Г., Же́lezна Т.А., Па́стух А.В., Драгне́в С.В. Можливості заготівлі деревного палива в лісах України. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України № 19, 2018. <https://uabio.org/activity/276/>

12. Гелету́ха Г.Г. та ін. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України № 26, 2020. <https://uabio.org/materials/9115/>

ANALYSIS OF PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR USING UKRAINE'S BIOMASS POTENTIAL FOR ENERGY

Geletukha G.G.¹, Zheliezna T.A.², Kucheruk P.P.³, Drahnev S.V.⁴

¹Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-5249-3092, e-mail: geletukha@biomass.kiev.ua

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@biomass.kiev.ua

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-1888-0774, e-mail: kucheruk@biomass.kiev.ua

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@biomass.kiev.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>

The purpose of the work is a comprehensive assessment of Ukraine's bioenergy potential. The task of the work is to develop recommendations for the practical implementation of promising directions for the potential utilisation. The research methods include calculations, study and analysis of literature, statistics and other data. The availability of considerable biomass potential for the production of various types of biofuel and energy is one of the main prerequisites for the successful development of bioenergy in Ukraine. Results of the assessment based on 2021 data show that the potential of biomass for energy in the country amounts to nearly 26 Mtoe/year. A comprehensive assessment of the potential was carried out for such components as solid biomass, biofuel and biogas. Sources of solid biomass are various agricultural residues, various types of wood biomass and energy crops (provided they are grown on unused agricultural land). Solid biomass in the amount of more than 16 Mtoe/year is the largest component of the country's biomass energy potential accounting for 62% of the total. Expert assessments indicate the possibility of increasing this potential to about 44 Mtoe/year in the period until 2050. A scenario for the long-term use of the biomass potential

for energy and biofuel production has been developed taking into account sustainability issues. To implement this scenario, it is necessary to overcome a number of barriers existing in the bioenergy sector, primarily the main ones. It also seems necessary to temporarily liberalize for Ukraine the strict sustainability criteria established by the EU RED II. This mitigation should include postponing the requirement to reduce greenhouse gas emissions (65% for biofuels and biogas for transport produced in installations that started operation from 01.01.2021); establishing a special limit for Ukraine until 2030 on the use of energy from first-generation biofuels in transport (up to 7%); expanding for Ukraine the list of feedstock for the production of advanced biofuels, including regulation of possibility to obtain raw material for biofuel production on polluted, unused, low-productivity and degraded lands.

References 12, table 2, figures 4.

Key words: biomass, biomass potential, harvesting residues, biofuels, biogas, biomethane.

1. *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, 2018.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

2. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S. Analiz perspektyv ta pytan stalosti vyrobnytstva ridkykh motornykh biopalyv v YeS ta v Ukraini. [Analysis of prospects and sustainability issues of liquid motor biofuels production in the EU and in Ukraine.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 45, No. 1 (2023). – P. 46-54. (Ukr.)* <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.6>

3. *Report on Oilseeds and Products Annual*. USDA report E42022-0031, April 21, 2022. <https://bit.ly/3IEjGNV>

4. *Report on Biofuels Annual*. USDA report E42022-0048, July 13, 2022. <https://bit.ly/3JC18pq>

5. *World Agricultural Supply and Demand Estimates*. USDA, 2023.

<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0323.pdf>

6. *Annual Ethanol Production*. Renewable Fuels Association.

<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>

7. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*. Biofuels. <https://doi.org/10.1787/flb0b29c-en>

8. *S. Alberici, W. Grimme, G. Toop. Biomethane production potentials in the EU. Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050. A Gas for Climate report, 2022.* https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/10/Guidehouse_GfC_report_design_final_v3.pdf

9. *H. Li, D. Mehmooda, E. Thorina, Z. Yub.* Biomethane production via anaerobic digestion and biomass gasification // *Energy Procedia*. – 2017, v. 105, p. 1172-1177. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.490>
10. *J. Geelen.* Statistical Report on Biomass Supply. Bioenergy Europe, 2022, 56 p.
11. *Geletukha G., Zheliezna T., Pastukh A., Drahniev S.* *Mozhlyvosti zahotivli derevnoho palyva v lisakh Ukrainy.* [Opportunities for wood fuel harvesting in forests of Ukraine.]. UABio Position Paper N 19, 2018. (Ukr.) <https://uabio.org/activity/276/>
12. *Geletukha G. et al.* *Dorozhnia karta rozvytku bioenerhetyky Ukrainy do 2050 roku.* [Roadmap for bioenergy development in Ukraine until 2050]. UABio Position Paper N 26, 2020. (Ukr.) <https://uabio.org/materials/9115/>

Отримано 03.04.2023

Received 03.04.2023

УДК 628.164

СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ СОЛЕЙ ЖОРСТКОСТІ ВОДИ І ТЕПЛОМАСООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

Ободович О.М.,¹ докт. техн. наук, Сидоренко В.В.², канд. техн. наук, Целень Б.Я.³, канд. техн. наук,
Резакова Т.А.⁴, канд. техн. наук

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

¹завідувач відділу, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²с.н.с. e-mail: vrangel08@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

³пров. н.с. e-mail: b0d@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

⁴пров.н.с. e-mail: rezakova_ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.10>

В роботі наведено огляд існуючих технологій та обладнання для знесолення води, визначені їх переваги та недоліки. Проведено експерименти по використанню роторно-пульсаційного апарата (РПА) для знесолення води. Встановлено оптимальні технологічні параметри обробки води в РПА і доведено ефективність її очищення застосовуючи запропоноване обладнання в порівнянні з існуючим.

The paper presents an overview of existing technologies and equipment for water desalination and identifies their advantages and disadvantages. Experiments were carried out on the use of a rotary-pulsation apparatus for water desalination. The optimal technological parameters of water treatment in a rotary pulsation apparatus have been established. The efficiency of water treatment using the proposed equipment in comparison with the existing one has been proven.

Бібл.8, рис. 6.

Ключові слова: котел, водопідготовка, пом'якшення води, аміак, імпульс, роторно-пульсаційний апарат (РПА).

В промисловості, комунальній енергетиці та сільському господарстві країни працюють тисячі парових та водогрійних котлів середніх і низьких параметрів надійна робота який значною мірою визначається веденням раціонального водно-хімічного режиму.

Вода широко використовується як теплоносіє завдяки високій питомій теплоємності, відносній дешевизні і доступності, однак присутність в природній воді сторонніх домішок спричиняє низку проблем при експлуатації котельного обладнання починаючи з утворення різних відкладів на теплообмінних поверхнях і закінчуючи корозійними процесами обладнання і трубопроводів, що, в свою чергу, призводить до зниження ефективності роботи котлоагрегата, збільшення енерговитрат, прискореного зношування обладнання аж до повного дострокового виходу його з ладу.

Враховуючи вищенаведені причини, до живильної і котлової води встановлені певні вимоги щодо її якості, що описані «Правилами будови і безпечної експлуатації теплових і водогрійних котлів» або вимогами виробників котлового обладнання, де, зокрема, регламентується прозорість води, її жорсткість, вміст заліза і міді, кількість розчиненого у воді кисню, значення рН, вміст нафтопродуктів.

Отримання води з необхідними характеристиками у зв'язку з різним фізико-хімічним складом природних вод вимагає раціонального підходу до вибору технології та обладнання і в окремих випадках може бути складною задачею.

Домішки, що містяться у воді, можна розділити на дві групи: розчинені і нерозчинені (механічні). Висока каламутність, наявність зважених і колоїдних частинок призводить до накопичення шламу, забивання трубної системи котла і порушення циркуляції теплоносія. Залежно від джерела водозабору і кількісних показників нерозчинених забруднень вибирається метод механічного очищення і освітлення води. У найпростішому випадку застосовують механічний фільтр з рейтингом фільтрації 200-500 мкм, а при поверхневому водозаборі – додаткову обробку коагулянтами і флокулянтами з подальшим відстоюванням і освітленням.

До розчинених домішок, що впливають на роботу котлового обладнання, в першу чергу відносять солі жорсткості. При використанні жорсткої води відбувається утворення накипу на поверхні, погіршується тепловіддача, відбувається перегрів труб зі сторони нагрівання, що може привести до їх руйнування. Залежно від типу котла висуваються менш

або більш жорсткі вимоги щодо вмісту солей кальцію і магнію в живильній і котловій воді. На підставі вимог до необхідного ступеня очищення, вихідної жорсткості води і необхідної продуктивності обладнання вибирається спосіб її пом'якшення.

До основних способів пом'якшення води належать:

- а) пом'якшення води з використанням Натрієвої смоли;
- б) пом'якшення води шляхом вапнування;
- в) пом'якшення води шляхом зниження загального солевмісту на установках зворотного осмосу;
- г) пом'якшення води шляхом зниження загального солевмісту послідовним її пропусканням через Н, ОН-іонообмінні фільтри.

На сьогоднішній день проводяться дослідження в напрямку розроблення безреагентних методів, у яких для зниження жорсткості води використовується лише енергія ультразвукових коливань. За рівнем використовуваної акустичної потужності їх можна розділити на способи, де інтенсивність випромінюваного у воду ультразвуку не перевищує кавітаційного порогу в ній, і способи, що спричиняють виникненню у воді акустичної кавітації, що трансформує енергію пружної хвилі в енергію кавітаційного тиску. До перших відноситься спосіб озвучування простору котлів у вигляді закріплених ззовні джерел ультразвукових коливань – електроакустичних перетворювачів [1]. Сучасні аналоги цього способу та пристроїв для такого роду озвучування, у тому числі коливаннями, що передаються за допомогою самих стінок теплообмінного обладнання, описані в технічній літературі, а в патентній літературі практично відсутні, очевидно, завдяки інваріантності їх здійснення та широкої популярності з огляду технічних застосувань ультразвуку, зробленого у середині минулого століття Л. Бергманом та опублікованого у багатьох країнах [2]. Принцип акустичних докавітаційних способів запобігання утворенню накипу базується на збудженні у вже нагрітій воді малопотужних ультразвукових коливань. Під дією цих коливань солі жорсткості легше кристалізуються безпосередньо в товщі води, ніж на твердих стінках обладнання, якщо останні здійснюють згинальні коливання, що перешкоджають утворенню на них стабільних центрів кристалізації. Продукти об'ємної кристалізації є зваженою у воді дрібнодисперсною твердою фазою, яка або виноситься потоком, або осаджується і може бути легко видалена механічно. Випромінювачі ультразвуку кріплять до зовнішніх поверхонь котла або теплообмінника у певних точках і розташовують на них певним чином [3, 4].

Також відомі такі способи впливу, в яких крім енергії гармонійних ультразвукових хвиль, що поширюються у воді, використовують ще й енергію акустичної кавітації [5], що виникає в пружних хвилях при подоланні амплітудою звукового тиску деякого властивого воді за будь-яких конкретних фізичних умов кавітаційного порогу.

Відомі способи обробки різних рідин, включаючи воду, в кавітаційному потоці при заданій питомій об'ємній потужності енергії для ініціалізації акустичних коливань і реактори для їх здійснення, що можуть бути використані, в тому числі, і для зниження карбонатної жорсткості води. Дане обладнання розраховане на обробку рідин з широким спектром фізико-хімічних, зокрема акустичних властивостей і тому до нього не висуваються конкретні вимоги щодо рівня енергії кавітаційного впливу, що дозволив би забезпечити потрібний ефект пом'якшення води. Це перешкоджає їх використанню для гарантованого отримання результату без проведення додаткових досліджень та запровадження додаткових умов їх використання з цією метою.

Відомий спосіб обробки водних розчинів електролітів, тобто речовин, що легко дисоціюють у воді на іони, де інтенсивність ультразвуку, що викликає кавітацію, має інваріантне по відношенню до вмісту електроліту в розчині значення, тобто при будь-якому його вмісті перевищує поріг, вище якого величина виділеної за період ультразвуку потенційної енергії кавітації практично залишається постійною, оскільки досягає відомої фізичної межі, що існує для кавітації, що діє в одній пружній хвилі [6]. Ефект пом'якшення базується на переформуванні гідратних оболонок іонів розчинених електролітів та руйнуванні молекулярних кластерів води, тобто на підвищенні дисоціюючої здатності води за рахунок тимчасового переведення її в мономолекулярний стан [7].

Наведені вище способи безреагентного пом'якшення води в потоці реалізуються за рахунок ультразвукових хвиль та акустичної кавітації. Основним недоліком вищенаведених способів є необхідність озвучування простору водогрійних котлів шляхом закріплення на них ззовні джерел ультразвукових коливань – електроакустичних перетворювачів.

Метою роботи є підвищення якості пом'якшеної води, зниження витрати реагентів та інтенсифікація процесу пом'якшення води шляхом застосування тепломасообмінного обладнання.

Для досягнення поставленої мети розроблено тепломасообмінне обладнання, в якому передбачено створення великої кількості рівномірно розподілених

у воді робочих органів (робочих елементів), що трансформують стаціонарну теплову або інші види енергії в дискретні в часі і просторі енергетично потужні імпульси. Ударні та ультразвукові хвилі, які супроводжують ці явища, міжфазна турбулентність, акустична і гідродинамічна кавітація, проникаючі кумулятивні мікрострумини та вихори спричиняють появу на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсифікації перебігу процесу пом'якшення води, значного збільшення поверхні контакту фаз, посиленню процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти у ви-

падку використання закріплених ззовні джерел ультразвукових коливань – електромагнітних перетворювачів – є недосяжними.

Розроблене тепломасообмінне обладнання для дослідження перебігу процесу пом'якшення води було виконане у вигляді роторно-пульсаційного апарата (РПА) спеціальної конструкції з реалізацією впливу на рідину методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Теоретичне дослідження механізмів методу ДІВЕ, технологічні та інженерні доповнення і узагальнення до нього наведені в [8–13]. Схему РПА наведено на рис. 1, а його робочі органи – на рис. 2.

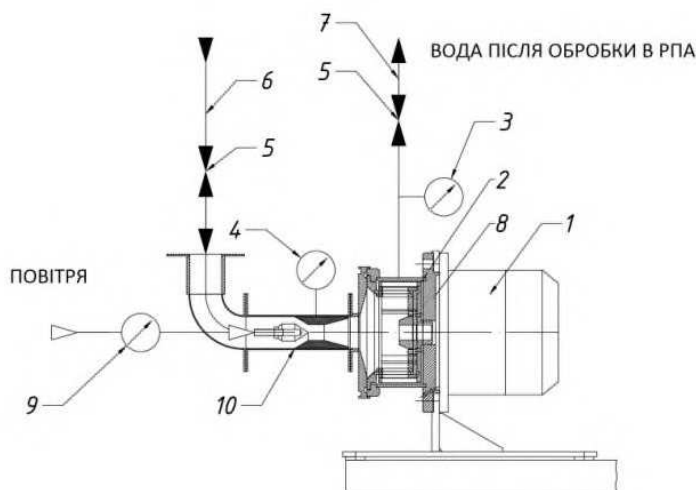


Рис. 1. Схема РПА: 1 – електродвигун; 2 – роторно-пульсаційний вузол; 3 – манометр для вимірювання тиску на виході з роторно-пульсаційного вузла; 4 – вакуумметр для вимірювання розрідження у вхідному патрубку; 5 – двоходовий кран; 6 – приймальний трубопровід; 7 – випускний трубопровід; 8 – корпус РПА; 9 – ротаметр; 10 – ежекторний вузол

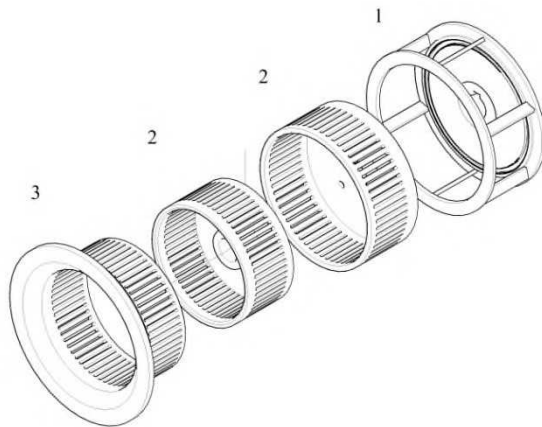


Рис. 2. Робочі органи роторно-пульсаційного вузла: 1 – робоче колесо відцентрованого насоса; 2 – ротор; 3 – статор

Апаратурно-технологічну схему роторно-пульсаційної установки наведено на рис. 3. Загальний вигляд роторно-пульсаційної установки зображений на рис. 4.

Роторно-пульсаційна установка працює наступним чином. В приймальний бункер 1 подають воду, що очищується та, при необхідності, додаткові хімічні реагенти. Далі відкривають двоходовий кран 2. Вода або її суміш з хімічними реагентами надходить в РПА де піддається впливу вищеописаних ефектів. Після цього вода повертається в приймальний бункер 1 і знову циркулює по контуру. Після закінчення обробки шляхом

переключення трьохходового крану 5 вода подається на відстоювання та фільтрацію. У вхідний патрубок РПА також можна подаватися повітря.

Пом'якшення води здійснювали в наступним чином. Вихідну воду подавали в приймальний бункер 1, де для очищення від солей жорсткості додатково вводили водний розчин аміаку (NH_4OH) в кількості 0,002...0,0052 %.

Далі вмикали РПА забезпечуючи циркуляцію суміші води з аміаком по контуру «приймальний бункер– РПА – приймальний бункер» і її обробку.

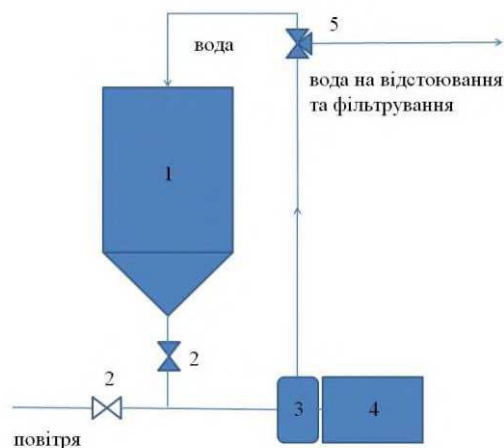


Рис. 3. Апаратурно-технологічна схема роторно-пульсаційної установки: 1 – приймальний бункер; 2 – двоходовий кран; 3 – РПА; 4 – електродвигун; 5 – триходовий кран



Рис. 4. Загальний вигляд роторно-пульсаційної установки

Водо-аміачну суміш обробляли в РПА при частоті пульсацій потоку 3...5 кГц з амплітудою перепаду тиску 360...400 кПа до досягнення температури 40°C, що спричинялось дисипативним тепловиділенням в потоці.

При проведенні експериментів було досліджено залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації аміаку та амплітуди перепаду тиску (рис 5). Частота пульсацій потоку залишалась незмінною і становила 4 кГц.

Встановлено, що ступінь пом'якшення води 99% спостерігається при масовій концентрації аміаку 0,022% з амплітудою перепаду тиску 400 кПа.

Зі зниженням амплітуди перепаду тиску до 380 кПа та 360 кПа ступінь пом'якшення води знижується до 90 % та 95 % відповідно.

З огляду на це концентрацію аміаку не варто підвищувати більш ніж 0,022%. В подальших

Табл. 1. Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації розчину аміаку та частоти пульсації потоку f

Масова концентрація розчину аміаку, %	Ступінь пом'якшення води, %		
	$f = 3,0$ кГц	$f = 4,0$ кГц	$f = 5,0$ кГц
0,000	15,0	17,0	21,0
0,012	93,0	94,0	96,0
0,022	97,0	99,0	99,0
0,032	98,0	99,0	99,0
0,042	98,0	99,0	99,0
0,052	98,0	99,0	99,0

дослідженнях незмінним параметром залишалась амплітуда перепаду тиску, що становила 400 кПа.

Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації розчину аміаку і частоти пульсації потоку наведено в таблиці 1.

Дані таблиці 1 показують, що при частоті пульсації потоку 4 кГц і масовій концентрації розчину аміаку 0,022% ступінь пом'якшення води становить 99%. Подальше збільшення вказаних параметрів не дає бажаного результату, а лише підвищує енергозатрати і витрату реагентів.

Таким чином встановлено, що знесолення води застосовуючи РПА слід проводити в режимі рециркуляції розчину аміаку з концентрацією 0,022% при частоті пульсацій потоку 4 кГц з амплітудою перепаду тиску 400 кПа.

Порівняльний аналіз способу знесолення води з застосуванням РПА зі способом механічної активації шляхом пропускання потоку води крізь мембранну систему з отворами діаметром не більше 1мм [13] показав ефективність першого способу.

Ефективність запропонованого способу підготовки води полягає в зниженні необхідної концентрації розчину аміаку більше ніж в два рази і підвищенні ступеня пом'якшення води з 93 % до 99 % у порівнянні з існуючим.

Доцільність застосування РПА при вилученні солей жорсткості досягається за рахунок надтеплого механізму переведення розчинних бікарбонатів в нерозчинну карбонатну форму. Механізм цих реакцій базується на руйнуванні кавітаційними імпульсами тиску, що розповсюджуються у воді гідратних оболонок розчинених у воді бікарбонатів $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ та $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$

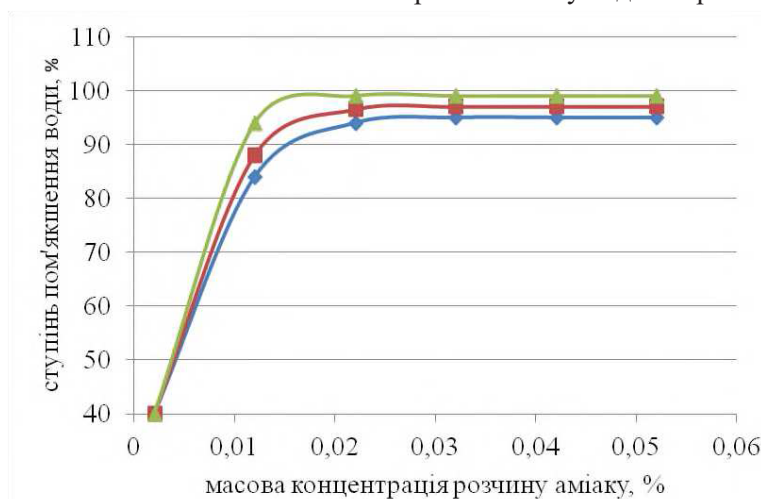


Рис. 5. Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації аміаку та амплітуди перепаду тиску: ♦ - 360; ■ – 380; ▲ – 400 кПа

призводячи до гідратації іонів і стимулюванні переходу солей жорсткості в аморфну колоїдну форму CaCO_3 і MgCO_3 .

Деякі фізичні властивості води можуть зворотньо змінюватись внаслідок її насичення бульбашками повітря. Після проходження водним потоком РПА, в якому за рахунок переходу гідростатичного тиску в динамічний напір (реалізується перехід потенційної енергії в кінетичну) виникає газорідний потік з великою площею питомої поверхні контакту фаз, що дозволяє частково вилучати з рідини розчинені гази, зокрема вуглекислоту.

Відомо, що надмірна вільна вуглекислота, на відміну рівноважної, дуже активна і називається агресивною, будучи однією з головних причин корозії трубопроводів. Частина її, діючи на карбонат кальцію, перетворює його на гідрокарбонат, а інша переходить у рівноважну вугільну кислоту для утримання його в розчині. В результаті збільшення площі поверхні контакту фаз полегшуються реакції з молекулами середовища та іншими твердими тілами, порушується кристалічна решітка, вода стає нестабільною і в результаті хімічної реакції випадає осад CaCO_3 і MgCO_3 . Також спостерігається поява осаду $\text{Fe}(\text{OH})_3$ внаслідок зміни рН води.

Таким чином, застосування РПА для вилучення з води від солей жорсткості може знайти промислове застосування.

Висновки.

Видалення солей жорсткості з води актуальне для підприємств комунального господарства, практично всіх галузей промисловості, але в першу чергу для теплоенергетики. В роботі наведено огляд існуючих технологій та обладнання для знесолення води, визначені їх переваги та недоліки. Показано доцільність застосування методу ДІВЕ для підвищення ефективності зниження жорсткості води. Описано конструкцію РПА, в котрому реалізується метод ДІВЕ. Проведено експерименти по використанню РПА для знесолення води. Встановлено оптимальні технологічні параметри обробки води в РПА. Доведено ефективність очищення води із застосуванням запропонованого обладнання порівняно з існуючим.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент US 10427956B2 C02F1/36 Ultrasound and acoustophoresis for water purification/Jason Dionne, Bart Lipkens, Edward Rietman
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Издательство Иностранной литературы, 1996. – 726 с.
3. Новик А.А. Ультразвуковые установки для борьбы с отложением накипи. URL: www.utinlab.ru
4. Николаевский Н.Н. Ультразвуковой метод предотвращения накипеобразования. Новости теплоснабжения. 2002, №. 10 (26). С. 44 - 45
5. Allen T. Ultrasonic water softener for pie cleaning. URL: www.processingtalk.com
6. Шестаков С.Д. О распределении плотности потенциальной энергии многопузырьковой кавитации относительно порождающей ее гармонической волны. Труды XVI сессии Российского акустического общества, Т.1. – М.: ГЕОС, 2005.
7. Rogov I.A., Shestakov S.D. «Надтепловое» изменение термодинамического равновесия воды и водных растворов: заблуждения и реальность (часть 1). Хранение и переработка сельхозсырья. 2004. №6. С. 39-44
8. Долинский А.А., Б.И. Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологиях. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 208 с.
9. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. – К.: Наукова думка, 2008. – 381 с.
10. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий. Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69, №6. С. 35 - 43.
11. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, №2. С. 58-68.
12. Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация: Монография. – Х.: Віровець АП “Апостроф”, 2012. – 185 с.
13. Oleksandr M. Obodovych, Bogdan Ya. Tselen, Vitalii V. Sydorenko, Heorhii K. Ivanytskyi, Natalia L. Radchenko Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. 2022. Acta Periodica Technologica. Issue.53 P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
14. Патент RU 2522602. МПК C02F 5/02 (2006.01) C02F 1/66(2006.01). Способ умягчения воды/ В.И. Косинцев, Н.В. Маланова, А.И. Сечин С.П. Журавков, Н.А. Яворовский

METHOD OF REDUCING WATER HARDNESS SALTS AND HEAT AND MASS EXCHANGE EQUIPMENT FOR ITS IMPLEMENTATION

Obodovych O.M.¹, Sydorenko V.V.², Tselen B.Y.³,
Rezakova T.A.⁴

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

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

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of
the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii
Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-5213-0219](https://orcid.org/0000-0001-5213-0219), e-mail: b0d@ukr.net

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of
the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii
Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: rezakova_ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.10>

Thousands of steam and water boilers of medium and low parameters operate in the country's industry, municipal energy, and agriculture. Their reliable work is largely determined by maintaining a rational water-chemical regime. Dissolved impurities that affect the operation of boiler equipment primarily include hardness salts. When using hard water, scale is formed on the surfaces, heat transfer deteriorates, and pipes are overheated from the heating side, which can lead to their destruction.

The purpose of the work is to improve the quality of softened water, reduce the consumption of reagents, and accelerate the softening process due to the use of heat and mass exchange equipment.

In the work, water desalination was carried out by the method of discrete-pulse energy input in a rotor-pulsation apparatus. Ammonia was used as a reagent for removing hardness salts. The water-ammonia mixture is processed in the rotor-pulsation apparatus at a flow pulsation frequency of 3-5 kHz and a pressure drop amplitude of 360-400 kPa until the temperature rises to 40°C. The increase in temperature occurs due to the transition of mechanical energy into thermal energy.

It was determined that the degree of softening of water is 99% at a mass concentration of ammonia of 0.022%, and the amplitude of the pressure drop is 400 kPa. As the amplitude of the pressure drop decreases to 380 and 360 kPa, the degree of water softening decreases to 90 and 95%, respectively. It is also determined that water desalination using the rotor-pulsation apparatus should be carried out in the mode of recirculation of ammonia solution with a concentration of 0.022%, with a flow pulsation frequency of 4 kHz and a pressure drop amplitude of 400 kPa. As a result of the work, the optimal technological parameters of water treatment were determined and the efficiency of its purification using the proposed equipment was proved in comparison with the conventional one.

References 14, tables 1, figures 5

Key words: boilers, water treatment, softening, ammonia, impulse, equipment.

1. *Patent US 10427956B2 C02F1/36* Ultrasound and acoustophoresis for water purification/Jason Dionne, Bart Lipkens, Edward Rietman

2. *Bergman L.* Ultrazvuk i ego primeneniye v nauke i tehnikе [Ultrasound and its application in science and technology]. – M.: Izdatelstvo Inostrannoy literatury, 1996. – 726 p. (in Rus.)

3. *Novik A.A.* Ultrazvukovyye ustanovki dlya borbyi s otlozheniyem nakipi [Ultrasonic units for scale control]. URL: www.utinlab.ru (in Rus.)

4. *Nikolaevskiy N.N.* Ultrazvukovoy metod predotvrascheniya nakipeobrazovaniya [Ultrasonic scale prevention method]. [Heat supply news]. 2002, No. 10 (26). P. 44 – 45. (in Rus.)

5. *Allen T.* Ultrasonic water softener for pie cleaning. URL: www.processingtalk.com

6. *Shestakov S.D.* O raspredelenii plotnosti potentsialnoy energii mnogopuzyrkovoy kavitatsii otnositelno porozhdayuschey ee garmonicheskoy volny. Trudy XVI sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva [On the distribution of the potential energy density of multi-bubble cavitation with respect to the harmonic wave that generates it. Proceedings of the XVI session of the Russian Acoustic Society], Vol.1. – M.: GEOS, 2005. (in Rus.)

7. *Rogov I.A., Shestakov S.D.* «Nadteplovoye» izmeneniye termodinamicheskogo ravnovesiya vody i vodnykh rastvorov: zabluzhdeniya i realnost (part 1) [«Suprathernal» change in the thermodynamic equilibrium of water and aqueous solutions: delusions and reality (part 1)]. [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2004. №6. P. 39-44. (in Rus.)

8. Dolinsky A.A., B.I. Basok B.I., Gulyiy I.S., Nakorchevsky A.I. Diskretno-impulsniy vvod energii v tehnologiyah [Discrete-pulse input of energy in technologies]. – K.: ITTF NANU, 1996. – 208 p. (in Rus.)
9. Dolinsky A.A., Ivanitsky G.K. Teplomassoobmen i gidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sredakh [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media Thermophysical foundations of discrete-pulse energy input]. – K.: Naukova dumka, 2008. – 381 p. (in Rus.)
10. Dolinsky A.A. Ispolzovanie printsipa diskretno-impulsnogo vvoda energii dlya sozdaniya effektivnykh energosberegayushchikh tehnologiy [Using the principle of discrete-pulse energy input to create efficient energy-saving technologies]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1996. T. 69, №6. P. 35 - 43. (in Rus.)
11. Nakorchevsky A.I., Basok B.I., Ryizhkova T.S. Gidrodinamika rotorno-pulsatsionnykh apparatov [Hydrodynamics of rotor-pulsation apparatus]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2002. T. 75, №2. P. 58-68. (in Rus.)
12. Dolinsky A.A., Obodovich A.N., Borhalenko Yu.A. Metod diskretno-impulsnogo vvoda energii i ego realizatsiya: Monografiya [Method of discrete-pulse energy input and its implementation: Monograph]. – Kharkiv: VIrovet AP “Apostrof”, 2012. – 185 p. (in Rus.)
13. Oleksandr M. Obodovych, Bogdan Ya. Tselen, Vitalii V. Sydorenko, Heorhii K. Ivanytskyi, Natalia L. Radchenko Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. 2022. Acta Periodica Technologica. Issue.53 P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
14. Patent RU 2522602. МПК C02F 5/02(2006.01) C02F 1/66(2006.01). Sposob umyagcheniya vodyi [Water softening method] / V.I. Kosintsev, N.V. Malanova, A.I. Sechin S.P. Zhuravkov, N.A. Yavorovskiy. (in Rus.)

Отримано 30.03.2023

Received 30.03.2023

УДК 621.039

КРИТЕРІЇ ТА УМОВИ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Скалозубов В.І.¹, докт. техн. наук, Дорож О. А.², к.т.н., Кондратюк В.А.³, к.т.н., Косенко С.І.⁴, к.т.н., Коньшин В.І.⁵, к.т.н.

¹Навчально-науковий інститут енергетики, Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

²Навчально-науковий інститут енергетики «Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-2911>, E-mail: odorog13@gmail.com

³Національний технічний університет України (КПІ ім. Ігоря Сікорського), просп. Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>, E-mail: prorector-agr@kpi.ua

⁴Навчально-науковий інститут енергетики, науковий співробітник Центру «Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>, E-mail: skosenko@op.edu.ua

⁵Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), просп. Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>, E-mail: vikonshin@meta.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.11>

Розроблено оригінальний метод визначення критеріїв та умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні залежно від визначальних параметрів термодинамічного стану реакторної установки. На основі термодинамічного підходу, що враховує рівень завершеності міжфазних тепломасообмінних процесів в акустичних хвилях тиску, визначено критерії та область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору. На основі розробленого критеріального методу визначено основні положення та вимоги до відповідних систем реакторного контролю/діагностики та симптомно-орієнтованих інструкцій з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів.

An original method of determining the criteria and conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone depending on the determining parameters of the thermodynamic state of the reactor plant has been developed. Based on the thermodynamic approach, which takes into account the level of completion of interphase heat and mass transfer processes in acoustic pressure waves, the criteria and area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core are determined. Based on the developed criterion method, the main provisions and requirements for the relevant reactor control/diagnostic systems and symptom-oriented instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactors are defined.

Бібл. 6.

Ключові слова: активна зона, ядерний реактор, термоакустична нестійкість.

Вступ. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Традиційний аналіз безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) полягає здебільшого в моделюванні імовірнісними й детерміністськими методами наслідків внутрішніх і зовнішніх вихідних аварійних подій - течії/розриви трубопроводів реакторного контуру й паропроводів; відмови систем, важливих для безпеки (СВБ); повне знеструмлення енергоблоків; землетруси; падіння великих об'єктів та ін. Водночас питання, пов'язані з причинами та наслідками виникнення різних видів термодинамічної нестійкості в СВБ, вивчені недостатньо.

Основними видами термодинамічної нестійкості є:

- імпульсна (аперіодична) нестійкість;
- низькочастотна коливальна нестійкість;
- високочастотна коливальна нестійкість.

Імпульсна(аперіодична)термодинамічна нестійкість характеризується високою амплітудною імпульсною ("стрибкоподібною") зміною термодинамічних параметрів і може виникати в запобіжних клапанах СВБ унаслідок гідро- і термоударів у СВБ, контурах природної циркуляції СВБ тощо.

Низькочастотна термодинамічна нестійкість може виникати в СВБ із насосним обладнанням, парогенераторних установках та інших СВБ. Низькочастот-

на термодинамічна нестійкість характеризується високо амплітудними коливаннями термодинамічних параметрів із частотою, яка визначається швидкістю руху робочого середовища і розмірами системи.

За певних умов низькочастотна нестійкість може бути наслідком імпульсної нестійкості і навпаки.

Високочастотна термодинамічна нестійкість характеризується високо амплітудними коливаннями тиску з частотою, що залежить від швидкості та часу поширення акустичних хвиль збурення (швидкості звуку). Експериментально встановлено, що за певних умов такий вид термодинамічної нестійкості з амплітудою коливань тиску до 50 % від середнього значення може виникнути в системах із термічно нерівноважним двофазним потоком. Тому такий вид термодинамічної нестійкості позначають терміном "термоакустична нестійкість (ТАН)". Наслідками виникнення ТАН теплоносія в активній зоні ядерного реактору можуть бути високо амплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішньо корпусні пристрої та порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Необхідно також зазначити, що компенсатори тиску реакторних установок усувають низькочастотні коливання параметрів і є не "чутливими" до термоакустичних коливань.

Разом з тим, до теперішнього часу відсутні відповідні системи реакторного контролю (СРК) умов ТАН в активній зоні реактору та аварійні інструкції з управління аваріями в умовах ТАН теплоносія в активній зоні реактору. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності обґрунтованих методів моделювання критеріїв та умов виникнення ТАН в активній зоні реактору.

Таким чином, актуальним питанням для забезпечення безпеки ЯЕУ є розроблення критеріїв, умов і меж області ТАН в активній зоні реактору.

У роботі [1] проведено оглядовий аналіз сучасних напрямів забезпечення та підвищення безпеки ядерної енергетики та встановлено недостатню обґрунтованість результатів аналізу безпеки ЯЕУ з ВВЕР імовірнісними та детерміністськими методами. Зокрема, недостатньо вивчено питання впливу різних видів термодинамічної нестійкості в СВБ на умови безпеки. У роботі [2] проведено аналіз умов виникнення низькочастотної термодинамічної нестійкості в режимах пуску насосів активних систем безпеки. Однак розглянуті в цій роботі моделі не відповідають умовам і причинам ТАН. У роботі [3] проведено аналіз умов виникнення імпульсної термодинамічної нестійкості в запобіжних клапанах реакторної установки. Однак

розглянуті в цій роботі моделі також не відповідають умовам ТАН. У роботі [4] проведено аналіз умов виникнення термогідродинамічних ударів (імпульсна термодинамічна нестійкість) внаслідок низькочастотної нестійкості в перехідних режимах насосів систем безпеки. Однак розглянуті в цій роботі моделі також не відповідають умовам ТАН теплоносія в активній зоні реактору. У роботі [5] подано експериментальні дані щодо умов виникнення ТАН у парогенеруючих каналах у досить широкому діапазоні визначальних термодинамічних параметрів. Однак ці експериментальні результати не визначили методи моделювання критеріїв і умов виникнення ТАН теплоносія в активній зоні реактору в робочих, перехідних і аварійних режимах. У роботі [6] отримав подальший розвиток термодинамічний принцип моделювання умов ТАН у термічно нерівноважних двофазних потоках бульбашкової структури. Однак розроблені детерміністські моделі також не визначили критерії та умови виникнення ТАН теплоносія для обґрунтування відповідних СРК і симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

Таким чином, актуальним питанням є розробка критеріальних методів моделювання умов ТАН в активній зоні реактору для обґрунтування відповідних СРК і симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи - розробити критеріальний метод моделювання умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору для обґрунтування відповідних систем реакторного контролю та симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

1. Розробити метод моделювання умов ТАН в активній зоні реактору в робочих, перехідних і аварійних режимах.

2. На основі розробленого методу визначити і провести верифікацію області термодинамічних параметрів умов ТАН теплоносія в активній зоні реактору.

3. Розробити методичне забезпечення відповідних систем діагностики та симптомно-орієнтовані інструкції з управління аваріями в умовах ТАН теплоносія в активній зоні реактору.

4. Аналіз критеріїв та умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору.

Основні положення і припущення.

1. Активна зона реактору моделюється прямоточним каналом з еквівалентними конструкційно-технічними параметрами:

- висота активної зони;
- площа поверхні нагріву;

- площа прохідного перерізу теплоносія;
- масова витрата теплоносія;
- потужність тепловиділень;
- температура теплоносія на вході та виході з активної зони;

- тиск теплоносія активної зони.

2. Критерії та умови ТАН засновані на:

- фундаментальному термодинамічному принципі нестійкості систем [6] - система перебуває в нестійкому рівноважному термодинамічному стані в разі одночасної однакової зміни (збільшення або зменшення) тиску і маси;

- резонансних ефектах у разі збігу частот конденсації парової фази та акустичних коливань тиску.

3. Потік теплоносія моделюється двома взаємодіючими зонами:

- двофазна зона на поверхні нагрівання (поверхнева зона);
- однофазна центральна зона потоку теплоносія.

Теплоносій у поверхневій і центральній зонах моделюється консервативною спрощеною теплогидродинамічною моделлю з усередненими параметрами за об'ємом активної зони.

4. Початковий стан теплоносія - стаціонарний теплогидродинамічно рівноважний в активній зоні під час роботи реактору на потужності.

На рівноважний стан теплоносія моделюються два типи незалежних збурень (відхилень) теплогидродинамічних параметрів від рівноважного стану:

- високочастотні акустичні коливання тиску в потоці теплоносія;
- низькочастотні флуктуаційні коливання витрати теплоносія внаслідок нестійкої роботи насосів.

5. Основна (енергетична) частота акустичних коливань тиску в теплоносії ω_a визначається висотою (довжиною) активної зони H і швидкістю звуку в двофазному теплоносії v_a :

$$\omega_a = 1/t_a = v_a / H. \quad (1)$$

Максимальна амплітуда акустичних збурень визначається співвідношенням часових періодів акустичних коливань t_a та тривалості "життя" на поверхні нагріву парової фази що періодично конденсується, t_c .

Якщо $t_a \neq t_c$, то за повний період акустичного коливання тиску відбувається неодноразова термодинамічна взаємодія акустичних коливань тиску в потоці теплоносія з паровою фазою, що періодично конденсується, на поверхні нагрівання. За певних умов цієї взаємодії амплітуда коливань тиску може збільшуватися (умови ТАН).

Якщо $t_a = t_c$, то акустичні імпульси тиску збігаються за часом з імпульсами тиску внаслідок конденсації парової фази та можуть виникнути резонансні ефекти.

6. Основна частота флуктуаційних коливань витрати теплоносія ω_g визначається швидкістю руху теплоносія v_g і довжиною реакторного контуру L :

$$\omega_g = v_g / L, \quad (2)$$

Таким чином, у загальному випадку необхідно аналізувати два різних режими умов виникнення ТАН:

- умови збігу основної частоти акустичних коливань ω_a і частоти конденсації парової фази ω_c (резонансний режим)

$$\omega_a = \omega_c \quad (3)$$

- умови виникнення термоакустичних коливань внаслідок незавершеності тепло масо обмінних процесів парової фази, що конденсується, в акустичних хвилях теплоносія (термодинамічний режим).

Критерії та умови ТАН у резонансному режимі.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння масового і теплового балансу парової фази:

$$\frac{d\rho_v V_v}{dt} = \frac{-\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{i_v - i_l}, \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_v V_v i_v}{dt} = -\alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (5)$$

де ρ_v - густина пари;

V_v - об'єм парової фази;

t - час;

α_c - коефіцієнт тепловіддачі конденсації;

F_c - площа поверхні конденсації;

T_v, T_l - температура парової та рідинної фази теплоносія;

i_v, i_l - питома ентальпія парової та рідинної фази теплоносія;

P - тиск.

Після перетворення рівнянь (3) і (4) отримаємо нелінійне диференціальне рівняння 1-го порядку:

$$a_1 \frac{dV_v}{dt} + a_2 V_v + a_3 = 0, \quad (6)$$

$$V_v(t=0) = V_{v0}, V_v(t=t_c) = 0, \quad (7)$$

де $a_1 = \rho_v$;

$$a_2 = -a_v^2 \frac{\alpha_2 - i_v \alpha_1}{\rho_v V_v \frac{di_v}{dP}};$$

$$a_3 = \alpha_1;$$

$$\alpha_1 = \frac{-\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{i_v - i_l};$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 (i_v - i_l);$$

$$a_v = \sqrt{\frac{d\rho_v}{dP}} \text{ - швидкість звуку в паровій фазі.}$$

За допущення сталості теплофізичних властивостей пари в процесі імпульсу конденсації розв'язок рівнянь (6) і (7) щодо частоти конденсації парової фази:

$$\omega_c = \frac{1}{t_c} = f_c(V_{v0}, a_1, a_2, a_3). \quad (8)$$

Тоді з урахуванням (1), (3) і (8) критерій і умови резонансного режиму ТАН:

$$K_R = \frac{f_c H}{v_a} = 1. \quad (9)$$

Критерії та умови ТАН у термодинамічному режимі.

З урахуванням прийнятих положень і припущень рівняння теплового і масового балансу в поверхневій і центральній зонах теплоносія:

$$G_v(i_v - i_l) = N - \alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (10)$$

$$G_l(i_{lc} - i_{l0}) = \alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (11)$$

$$G = G_l + G_v, \quad (12)$$

де N - теплова потужність тепловиділень;

i_{lc}, i_{l0} - питома ентальпія рідинної фази теплоносія на виході та вході в активну зону відповідно;

G_p, G_v - масова витрата теплоносія в центральній і паронасиченій поверхневій зоні відповідно.

Визначальні параметри міжфазного тепломасо-обміну α_c і F_c визначалися за відомими консервативними напівемпіричними залежностями [6].

Після перетворень рівнянь (10) - (12) рівняння рівноважного термодинамічного стану теплоносія в безрозмірному критеріальному форматі:

$$K_1(G, P) = K_2(P, G), \quad (13)$$

де визначальний критерій термодинамічного стану теплоносія в активній зоні

$$K_1 = \frac{G(i_{lc} - i_{l0})}{N}. \quad (14)$$

Критерій K_2 відображає завершеність тепломасо-обмінних процесів між поверхневою та центральною зонами теплоносія:

$$K_2 = \frac{[N - \alpha_c F_c (T_v - T_l)](i_{lc} - i_{l0})}{N(i_v - i_l)} + \frac{\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{N}. \quad (15)$$

Рівняння (13) у форматі високочастотних акустичних збурень (відхилень) тиску $\delta P \ll P$ і низькочастотних збурень витрати $\delta G \ll G$:

$$\omega_g \frac{\partial K_1}{\partial G} \delta G + \omega_a \frac{\partial K_1}{\partial P} \delta P = \omega_a \frac{\partial K_2}{\partial P} \delta P + \omega_g \frac{\partial K_2}{\partial G} \delta G \quad (16)$$

Після перетворення рівняння (16) термодинамічний критерій ТАН теплоносія в активній зоні:

$$K_{TA} = \frac{\delta P}{\delta G} = \frac{\omega_g \left(\frac{\partial K_2}{\partial G} - \frac{\partial K_1}{\partial G} \right)}{\omega_a \left(\frac{\partial K_1}{\partial P} - \frac{\partial K_2}{\partial P} \right)}. \quad (17)$$

Відповідно до прийнятого термодинамічного принципу нестійкості систем теплоносій в активній зоні стійкий до термоакустичних коливань за умови

$$K_{TA} < 0. \quad (18)$$

Умови ТАН теплоносія в активній зоні:

$$K_{TA} > 0. \quad (19)$$

Умови (19) означають, що за спільних акустичних збурень тиску і флуктуаційних низькочастотних збурень, значення амплітуди термоакустичних коливань параметрів теплоносія збільшуються. Негативними наслідками цих ефектів є: високо амплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішню корпусні конструкції реактору; деформація ТВЕЛів; підвищена вібрація; порушення герметичності оболонок ТВЕЛів тощо.

Відповідно до отриманого критерію ТАН (17) амплітуда термоакустичних коливань тиску істотно залежить від частоти коливань ω_a (1).

Для відносно "коротких" каналів ($H \ll 1$ м) відповідно до формули (1) ω_a має підвищене значення та згідно з (17) визначає знижені амплітуди термоакустичних коливань тиску, які за певних умов можуть бути співставними з турбулентними або акустичними коливаннями. У цьому разі визначальним може бути резонансний режим умов ТАН.

Для каналів з $H > 1$ м основна (енергетична) частота зменшується, а амплітуди термоакустичних коливань тиску відповідно збільшуються.

Аналіз отриманих критеріїв та умов ТАН.

Розрахункове моделювання критерію та умов резонансного режиму ТАН теплоносія (9) здійснювали варіюванням основних визначальних параметрів K_R - "недогріву" теплоносія в центральній зоні $T_v - T_l$ і висоти активної зони H . Параметри міжфазного тепломасообміну визначалися за консервативними напівемпіричними залежностями [6]. У результаті проведеного розрахункового аналізу встановлено, що область резонансного режиму ТАН:

$$H < 1,0 \text{ м}; \quad T_v - T_l > 80 \text{ К}. \quad (20)$$

Область резонансного режиму (20) не характерна параметрам активної зони реакторів промислових ЯЕУ.

Область ТАН у термодинамічному режимі здійснювалася розрахунковим варіюванням визначального критерію термодинамічного стану теплоносія в активній зоні реактора K_f . У результаті розрахункового моделювання визначено область ТАН у термодинамічному режимі:

$$K_o \leq K_1 \leq K_e, \quad (21)$$

де K_o , K_e - "нижня" і "верхня" межа області ТАН теплоносія в активній зоні відповідно.

"Нижня" межа області ТАН відповідає умовам початку значної довжини ділянок із "недогрітим" поверхневим кипінням.

"Верхня" межа області ТАН (21) відповідає умовам значної довжини ділянок з однофазним теплоносієм.

Для активної зони реакторів ВВЕР-1000 визначено:

$$K_o = 0,7 K_{10}; \quad K_e = 0,9 K_{10},$$

де K_{10} - визначальний параметр термодинамічного стану реактора в номінальному робочому режимі на потужності.

Режим ТАН теплоносія може виникнути, наприклад, у разі заклинювання одного або двох головних циркуляційних насосів під час роботи реактору на номінальній потужності.

Аналіз отриманого термодинамічного критерію ТАН встановив, що основною причиною виникнення термоакустичних коливань за певних умов є незавершеність міжфазних теплообмінних процесів в акустичних збуреннях тиску та збуреннях витрати теплоносія.

Аналіз консервативності прийнятих припущень під час моделювання термодинаміки теплоносія в активній зоні встановив таке.

1. Допущення про усередненість визначальних параметрів теплоносія за обсягом активної зони консервативно "розширює" розрахункову область ТАН. Крім того, більш "реалістичні" моделі термодинаміки теплоносія в активній зоні (наприклад, у відомих детерміністських кодах, що моделюють аварійні процеси), що враховують просторову нерівномірність розподілу параметрів теплоносія за висотою активної зони, використовують окремі недостатньо фізично обґрунтовані параметри міжфазної взаємодії [6].

2. У реальних умовах нормальної експлуатації реакторних установок теплове навантаження (потужність тепловиділень) нерівномірне за висотою активної зони: мінімальні теплові навантаження на початку та закінченні активної зони, а максимальні теплові навантаження в центральній частині активної зони. Тому початок інтенсивного поверхневого кипіння в реальних умовах починається вище в активній зоні, ніж у прийнятій моделі рівномірного розподілу теплового навантаження за висотою активної зони. Отже, прийнята модель рівномірного розподілу теплового навантаження консервативно "розширює" область ТАН. Цей висновок підтверджується результатами експериментів [5] щодо впливу розподілу теплового навантаження (за інших рівних умов) на область виникнення ТАН.

3. У прийнятих моделях резонансного і термодинамічного режимів умов ТАН не враховується вплив газонасиченості теплоносія. В експериментах [5] встановлено, що збільшення газонасиченості теплоносія зменшує область ТАН. Цей ефект пов'язаний з тим, що присутність газу обмежує інтенсивність тепломасообмінних процесів міжфазної взаємодії. Тому прийняте припущення про відсутність газонасиченості теплоносія також цілком консервативне.

Однак прийняті припущення при моделюванні критеріїв і умов ТАН теплоносія в активній зоні реактору визначають необхідність відповідної експериментальної верифікації встановленої області ТАН (21).

Експериментальна верифікація області ТАН (21) у натурних умовах реакторної установки є неприпустимою, оскільки при цьому виникає "штучне" зниження ядерної безпеки. Крім того, відсутня відповідна система реакторного контролю (СРК) умов виникнення ТАН.

Для верифікації області ТАН (21) можуть бути застосовані відповідні результати експериментів, отримані на експериментальних установках, що відповідають ідентичності критеріїв термодинамічної подібності процесів у натурних та експериментальних установках [6]. У даному випадку критерії термодинамічної подібності - визначальний критерій термодинамічного стану K_1 і тиск P .

Таким вимогам відповідають експериментальні результати області ТАН, отримані на експериментальній установці [5]. На основі проведеної експериментальної верифікації області ТАН (21) з урахуванням даних [5] встановлено, що максимальні розбіжності розрахункових і експериментальних результатів $\pm 30\%$ для "нижньої" межі області ТАН (21) і $\pm 15\%$ для "верхньої" межі.

5. Обговорення отриманих результатів

У режимах ТАН теплоносія в активній зоні реактору виникають високоамплітудні високочастотні динамічні навантаження, які можуть призвести до порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Отже, режими ТАН слід розглядати як вихідну подію аварії (ВПА) "ТАН в активній зоні".

Для забезпечення безпеки під час ВПА "ТАН в активній зоні" необхідно розробити і впровадити:

- системи реакторного контролю умов ТАН в активній зоні (СРК ТАН);
- симптомно-орієнтовані аварійні інструкції з управління аварією з ВПА "ТАН в активній зоні" (СОАІ ТАН).

Основою СРК ТАН може бути отримана в цій роботі область ТАН теплоносія в активній зоні (21) за поточним значенням визначального критерію термодинамічного стану $K_1(t)$, що визначається контрольованими параметрами: теплова потужність реактору; тиск у реакторі; температура теплоносія на вході та виході активної зони; витрата теплоносія.

СРК ТАН може бути застосована під час розроблення та впровадження СОАІ ТАН.

Якщо поточне значення критерію $K_1(t)$ розташоване в області ТАН (21), то оператор реакторної установки може вжити таких заходів:

- збільшити витрату теплоносія за незмінної потужності реактору;
- зменшити потужність реактору за незмінної витрати теплоносія.

Висновки

1. Наслідками термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні ядерних реакторів можуть бути високоамплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішньокорпусні конструкції та порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Разом з тим, до теперішнього часу відсутні відповідні системи реакторного контролю/діагностики та експлуатаційні симптомно-орієнтовані інструкції з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності обґрунтованих методів моделювання критеріїв та умов виникнення термоакустичної нестійкості в активній зоні.

2. Розроблено оригінальний метод визначення критеріїв і умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні залежно від визначальних параметрів термодинамічного стану реакторної установки.

3. Встановлено, що резонансний підхід моделювання умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні промислових реакторних установок за умови збігу частот акустичних коливань і конденсації парової фази не обґрунтований.

4. На основі термодинамічного підходу, що враховує рівень завершеності міжфазних тепломасообмінних процесів в акустичних хвилях тиску, визначено критерії та область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів. Встановлена область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору верифікована на основі відомих експериментальних даних, отриманих на експериментальній установці, яка відповідає за критеріями термодинамічної подібності активній зоні ВВЕР-1000.

5. На основі розробленого критеріального методу визначено основні положення та вимоги до відповідних систем реакторного контролю/діагностики та симптомно-орієнтованих інструкцій з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Верінов О.М. та ін. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. Ядерна та радіаційна безпека. 2022. № 3(95). С. 76 – 81.
2. Skalozubov V.I., Huiyu Zhou, Chulkin O.A., Pirkovskiy D.S. Modelling Method of Conditions for Reliability-Critical Hydraulic Impacts on Pumps of Thermal and Nuclear Power Plants. Problems of Atomic Science and Technology. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.
3. Skalozubov V., Bilous N., Pirkovskiy D. et al. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment. Nuclear and Radiation Safety. 2019. No. 2(82). С. 46 – 49.
4. Skalozubov V., Chulkin O., Pirkovskiy D. et al. Method for Determination of Water Hammer Conditions and Consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors. Turkish Journal of Physics. 2019. V. 43, No. 3. P. 229 – 235.
5. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of Thermoacoustic Oscillations in a Heated Channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1990. V. 59, No. 4. P. 1323 – 1328.
6. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме / Под ред. В.И. Скалозубова. Одесса: Астропринт, 2013. 244 с.

APPROACHES TO MODELING CONDITIONS OF THERMOACOUSTIC INSTABILITY IN NON-EQUILIBRIUM TWO-PHASE COOLANT OF NUCLEAR REACTORS

Skalozubov V.I.¹, Dorozh O.A.², Kondratyuk V.A.³, Kosenko S.I.⁴, Konshin V.I.⁵

¹Dr.Sci. (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology Sector of National Academy of Sciences of Ukraine, Odessa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044.

²PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-2911>, E-mail: odorog13@gmail.com

Department of Nuclear Power Plants of the Educational and Scientific Institute of Energy of the National University "Odesa Polytechnic", 65044, 1, Shevchenko av. Odessa, Ukraine.

³PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>, E-mail: prorektor-agr@kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637.

⁴PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>, E-mail: skosenko@op.edu.ua

Department of Nuclear Power Plants of the Educational and Scientific Institute of Energy of the National University "Odesa Polytechnic", 65044, 1, Shevchenko av. Odessa, Ukraine.

⁵PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>, E-mail: vikonshin@meta.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637.

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.11>

The consequences of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of nuclear reactors can be high-amplitude, high-frequency dynamic loads on the internal structures and a violation of the tightness of the TVEL shells. However, until now, there are no reactor control/diagnostic systems and operational instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core. The main reason for this situation is the lack of substantiated methods for modeling the criteria and conditions for the occurrence of thermoacoustic instability in the active zone. The purpose of the work is the development of a criterion method for modeling the conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactor to substantiate the appropriate

reactor control systems and symptom-oriented emergency instructions. An original method of determining the criteria and conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone depending on the determining parameters of the thermodynamic state of the reactor plant has been developed.. Based on the thermodynamic approach, which takes into account the level of completion of interphase heat and mass transfer processes in acoustic pressure waves, the criteria and area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core are determined. The established area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core was verified on the basis of known experimental data obtained at the experimental installation, which meets the criteria of thermodynamic similarity to the core of the VVER-1000 core. Based on the developed criterion method, the main provisions and requirements for the relevant reactor control/diagnostic systems and symptom-oriented instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactors are defined.

References 6.

Key words: active zone, nuclear reactor, thermoacoustic instability.

1. Kondratyuk V.A., Pismennyi E.M., Verinov O.M. ets. Pidvishennia bezpeki yadernoi energetiki z urahuvannyam urokiv vagkih avariiv [Improving the safety of nuclear energy, taking into account the lessons of severe accidents]. Yaderna i radiatsionnaia bezopasnost [Nuclear and Radiation Safety]. 2022. № 3(95). P. 76 – 81. (in.Ukr.)

2. Skalozubov V.I., Huiyu Zhou, Chulkin O.A., Pirkovskiy D.S. Modelling Method of Conditions for Reliability-Critical Hydraulic Impacts on Pumps of Thermal and Nuclear Power Plants. Problems of Atomic Science and Technology. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.

3. Skalozubov V., Bilous N., Pirkovskiy D. et al. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment. Nuclear and Radiation Safety. 2019. No. 2(82). P. 46 – 49.

4. Skalozubov V., Chulkin O., Pirkovskiy D. et al. Method for Determination of Water Hammer Conditions and Consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors. Turkish Journal of Physics. 2019. V. 43, No. 3. P. 229 – 235.

5. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of Thermoacoustic Oscillations in a Heated Channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1990. V. 59, No. 4. P. 1323 – 1328.

6. *Komplex metodov pereotzenki bezopasnosti atomnoy energetiki Ukraine s uchetom ekologicheskikh katastrof v Chernobyl i Fukushima* [The complex of methods of reassessment of the safety of atomic energy of Ukraine taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima] / Ed.V. Skalozubova Odessa: Astroprint, 2013. 244 p. (in Rus.)

Отримано 10.03.2023

Received 10.03.2023